

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER- BISKRA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL ET DE L'HYDRAULIQUE

N° d'ordre :

Série :

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : **GENIE CIVIL**

Option : **MATERIAUX DE CONSTRUCTION**

Présenté par

LOUMACHI LAZHAR

Thème

***EFFET DES GRANULATS DE LA REGION DE BISKRA SUR
LES PROPRIETES DU BETON ET LES METHODES DE
FORMULATION DE MELANGE***

SOUTENU LE :

Devant le jury :

Mr : GUETTALA .Abdelhamid	Président :	P.r	Université de Biskra
Mr : MEZGHICHE .Bouzidi	Rapporteur:	M.C	Université de Biskra
Mr : MELLAS .Mekki	Examineur:	M.C	Université de Biskra
Mr : ZAATAR. Abdallah	Examineur:	M.C	Université de Biskra

1-1 INTRODUCTION

Les granulats, tels que le sable les gravillons, pierre concassée etc..., sont des matériaux inertes qui constituent le squelette du béton. Dans la composition des bétons, il faut autant que possible, pour des raisons économiques et techniques, utiliser les matériaux locaux. En général, les sables et gravillons naturels alluvionnaires obtenus par criblage parfois avec concassage, sont satisfaisants, de même les roches éruptives ou sédimentaires concassés. Le recours à des granulats artificiels légers, qui sont des produits, tels que l'argile expansée, schistes expansés ou laitiers concassés, permet de formuler des bétons de densité réduite.

D'autre part les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et dans certains cas, chimiques influencent les performances des bétons. Le bon choix des granulats confère au béton une plus grande stabilité sur le plan volumique et meilleure durabilité.

La consommation d'agrégats est particulièrement importante dans les grands travaux publics, les infrastructures et les réseaux de toutes sortes. Parce qu'ils sont un point indispensable à l'économie nationale, les agrégats doivent être considérés à leur juste valeur dans la planification économique et l'aménagement du territoire. Les agrégats font partie des richesses naturelles au même titre que la forêt, l'agriculture, l'eau...etc.

La demande du public pour les agrégats vise la construction de routes, d'établissements d'enseignement, d'hôpitaux, d'habitations et d'entreprises. Les ressources en agrégats sont également en demande dans le secteur manufacturier pour produire de l'acide, du vinyle, du verre, de la peinture, du papier des produits pharmaceutiques, des fertilisants, du ciment et des produits d'aménagement paysager.

Grâce à l'accessibilité de ses ressources en agrégats, L'Algérie à pu offrir des coûts d'infrastructure et de logement adorables. La gestion judicieuse des ressources en agrégats et le juste équilibre des intérêts pour ces ressources assureront un approvisionnement continu à proximité du marché.

- **Plan de travail**

Pour bien cerner le sujet et arriver aux objectifs fixés précédemment. Nous avons donc mené un plan de travail qui se compose des parties suivantes :

- Le premier chapitre fait le point sur une introduction générale qui fait définir la problématique du sujet ainsi que les objectifs visés.
- Le deuxième chapitre est consacré à la recherche bibliographique, qui comporte une synthèse bibliographique, donc une revue de la documentation qui porte sur les travaux antérieurs concernant les agrégats et leur utilisation à travers quelques pays et évidemment leur influence dans la fabrication de béton.
- Le troisième chapitre, granulats, origines et caractéristiques fait le point sur les granulats est un ensemble de grains d'origine minérale, de dimensions comprises entre 0 et 80 mm, provenant de roches meubles, massives, de minerais ou de leurs transformations thermiques et de sous-produits de l'industrie.
- Le quatrième chapitre, ce chapitre présente à la fois les matériaux que nous utiliserons, et les méthodes qui seront mises en œuvre dans la suite de ce travail, après on exposera les caractéristiques chimiques et minéralogique de ces matériaux puis le plan expérimental de notre étude. L'objectif de ce travail est d'évaluer expérimentalement l'effet des différents minéraux des granulats de la région de Biskra sur la qualité du béton, qu'il soit frais ou durci, nous avons choisi de varier les différents constituants de béton tels que le dosage en ciment et le dosage en eau et d'utiliser 3 types de gravier.
- Le cinquième chapitre, ce mémoire avait pour but d'étudier le comportement des granulats et leur utilisation dans la confection du béton. Les travaux ont donc

contribué à l'amélioration des connaissances sur les propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux et leur influence sur le comportement du béton.

Dans ce chapitre, on étudie trois types de granulats de la région de Biskra. (Gravier de Ziani, gravier d'El hadjeb et le gravier d'Ain touta). Ce travail comprend cinq parties :

-1^{ère} partie : consiste à confectionner le Béton avec des éprouvettes (10×10×10) avec les trois graviers et utiliser cinq dosages de ciment HTS (250, 300, 350, 400 et 500) kg /m³ avec le sable de l'Oued et avec deux affaissements fermes (0÷4) cm et plastiques (5÷9) cm.

Aussi, on a utilisé deux méthodes de formulation de béton Skramtaev et Dreux Gorisse .

-2^{ème} partie : c'est de confectionner du béton avec un adjuvant avec différents pourcentages (0.05, 0.25 et 0.5) % toujours avec des éprouvettes (10×10×10) et les trois types de graviers et un dosage de 350 kg/m³ ,et la méthode de Skramtaev.

-3^{ème} partie : on suit les mêmes étapes de la 2^{ème} partie, sauf qu'on utilise ici un ajout de poudre de carrelage à la place de l'adjuvant.

Dans les trois premières parties, on vise la résistance à la compression.

-4^{ème} partie : on vise la résistance à la traction par fondage à l'aide d'éprouvettes (16×32) avec un dosage de 350 kg/cm³ et les trois types de graviers cités auparavant une composition avec adjuvant et une autre sans adjuvant et une 3^{ème} avec adjuvant + ajout.

-5^{eme} partie : ici, on vise la résistance a la flexion, et on suit les mêmes étapes que la 4^{eme} partie sauf que les éprouvettes dans ce cas sont (10×10×40) cm³

1-2 GENERALITES

Le contrôle des matériaux est une nécessité en cours d'approvisionnement, durant les travaux et après achèvement des ouvrages.

Il comprend des analyses et des essais de laboratoire, ainsi que l'interprétation des résultats qui sont des qualités qu'un bon technicien doit s'efforcer d'acquérir.

La réalisation de certains essais sur le chantier même, à la fois simples et essentiels, permet un gain appréciable de temps et permet d'éviter qu'une partie importante des travaux ne soit réalisée quand une erreur ou une malfaçon vient à être décelée. Le choix des prélèvements, le nombre des éprouvettes et la technique de manipulation ont une importance primordiale, ainsi que l'exploitation statique des résultats des essais.

Le choix des matériaux et les possibilités de leur emploi revêt une grande importance au point de vue de la réalisation d'un ouvrage. Ce choix n'est jamais arbitraire ; il est nécessaire de faire entrer en ligne de compte les performances à atteindre et les sujétions à respecter : dimensions, résistance mécanique, économie, production locale ou nationale, longévité, climat, situation et esthétique.

En plus du choix des divers matériaux, le problème de l'association de ceux-ci dans un même ouvrage, nécessite une parfaite connaissance non seulement des caractéristiques de chacun d'eux, mais aussi de leur comportement mutuel au sein du mélange de béton par exemple. Les caractéristiques d'utilisation des matériaux sont nombreuses et variées, mais ne présentent pas toutes le même degré d'importance, selon l'état physique normal et selon la destination de ce matériau.

En effet, l'ingénieur chargé de concevoir, construire et protéger un ouvrage doit mettre en deux ordres de facultés et de connaissances distinctes, mais inséparables:

- les unes ont pour objet l'élaboration d'une œuvre rationnelle aux points de vue du type, des formes et des dimensions de l'ouvrage à adopter, compte tenu de toutes les conditions mécaniques et physiques qui s'imposeront ; elles font appel à la science des lois de la mécanique ou de la résistance des matériaux, définissant le comportement général de la matière soumise à des contraintes résultant de l'application de forces extérieures.

- les autres ont trait à la science expérimentale relative aux matériaux mêmes qui seront mis en œuvre: elles doivent permettre d'estimer les comportements physique, chimique et mécanique de ces matériaux, associés suivant la conception générale de l'ouvrage à réaliser; elles sont à la base des techniques de préparation, de mise en œuvre et de conservation.

GENERALITES

Il est évident que les caractéristiques mécaniques sont essentielles pour les solides destinés à constituer des matériaux de résistance, tandis que, pour les matériaux de protection, les caractéristiques physiques et le comportement chimique deviennent prépondérants.

Dans notre travail, nous avons pris en considération les propriétés physiques et mécaniques des matériaux composant le béton, et notamment celles des granulats de la région de Biskra.

L'analyse des matériaux aux chantiers montre que la qualité des gros granulats, du sable et du ciment est inhomogène. En outre, l'absence du potentiel humain et matériel et par la suite le manque de contrôle nécessaire de la qualité et des propriétés des matières premières et de leur uniformité provoque dans la majorité des cas une diminution de la résistance et une dégradation de la qualité des ouvrages.

2- REVUE DE DOCUMENTATION

2-1 Introduction

Les granulats, tels que le sable les gravillons, pierre concassée etc..., sont des matériaux inertes qui constituent le squelette du béton. Dans la composition des bétons, il faut autant que possible, pour des raisons économiques et techniques, utiliser les matériaux locaux. En général, les sables et gravillons naturels alluvionnaires obtenus par criblage parfois avec concassage, sont satisfaisants, de même les roches éruptives ou sédimentaires concassés. Le recours à des granulats artificiels légers, qui sont des produits, tels que l'argile expansée, schistes expansés ou laitiers concassés, permet de formuler des bétons de densité réduite.

D'autre part les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et dans certains cas, chimiques influencent les performances des bétons. Le bon choix des granulats confère au béton une plus grande stabilité sur le plan volumique et meilleure durabilité.

En 1994, les expéditions canadiennes totales de granulats (principalement la pierre concassée, le sable et le gravier) ont, selon les statistiques provisoires les plus récentes, augmenté de moins de 1 % par rapport aux données définitives de 1993, pour s'établir à environ 314 Mt. En comparaison, les expéditions totales dépassaient les 350 Mt/a durant la période précédant la récession, soit de 1987 à 1990.

Les prix unitaires ont augmenté dans l'ensemble au même rythme que l'inflation, et les prix de vente ont fluctué considérablement en fonction de la proximité des centres de consommation. Les mises en chantier, qui constituent un bon indicateur de la demande de la plupart des matériaux de construction primaires, ont été de 168 300 en 1992, de 155 400 en 1993 et de 155 000 environ en 1994.

2-2 Aperçu sur les granulats : [1]

Au Canada, les granulats jouent un rôle essentiel dans la compétitivité économique des zones urbaines; leur importance, à cet égard, est de plus en plus reconnue. **En Ontario**, la nouvelle version de la Loi sur les ressources en agrégats de la province a remplacé en 1990 deux lois connexes et la partie applicable de la Loi sur les mines de la province; elle constitue probablement la loi la plus complète du genre au Canada.

La Aggregate Producers' Association of Ontario (APAO) a tenu en mai 1994 la réunion internationale AGGPAC Canada '94 parallèlement à la conférence minière mondiale Toronto '94. La manifestation, dont le clou fut une grande exposition de matériel d'exploitation, a constitué une occasion inégalée de rendre le grand public conscient de l'importance pour les grandes zones urbaines de disposer à proximité relative de sources de matériaux primaires.

En raison de son niveau relativement élevé d'urbanisation, il est particulièrement important de planifier l'utilisation des ressources en granulats dans le sud de l'Ontario, comme l'indique une étude de la question intitulée Aggregate Resources of Southern Ontario – A State of the Resource Study et publiée à la fin de 1993. Ce rapport, demandé par le ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, inclut une analyse globale des facteurs de l'offre et de la demande, des coûts, des questions liées à la législation et à la planification ainsi que des problèmes concernant le recyclage et la réutilisation.

La demande de granulats est principalement locale ou régionale et reflète de près les tendances de la construction au pays. Cependant, dans certaines régions peuplées, les marchés ne sont pas autosuffisants, comme en témoigne leur dépendance par rapport aux expéditions provenant d'autres régions.

De plus, les expéditions internationales de granulats en vrac ont été économiquement viables dans certaines régions.

Sable et gravier On trouve des gisements de sable et de gravier un peu partout. Aussi, les grands producteurs ont aménagé leur installation le plus près possible des grands centres de consommation. Ces grandes exploitations sont habituellement associées à d'autres activités, comme la préparation de béton prêt à l'emploi ou la fabrication de bitume. Elles sont aussi généralement complétées par une multitude de petits producteurs qui desservent des marchés locaux de façon saisonnière ou encore à la demande. Certaines exploitations relativement importantes peuvent ne fonctionner que par moments, servant de fournisseurs à des sociétés

de grands travaux. Il arrive également que des services provinciaux de voirie exploitent des carrières régionales où ils se procurent les matériaux servant à la construction ou à la réfection des routes.

La diversité même des intervenants du secteur des granulats rend difficile la collecte de données complètes sur la production et la consommation. C'est pourquoi certains estiment que la production totale de granulats, toutes sources confondues, pourrait être dans certaines provinces de 25 à 30 % plus élevée que ne l'indiquent les statistiques officielles. Dans ces estimations toutes sources confondues est comprises la production issue des zones désignées, des sources en bordure des routes, des carrières des voiries provinciales, des terres publiques et des terres privées.

Lorsque les gisements actuels situés à l'intérieur des terres seront épuisés, on pourra recourir de façon importante au dragage pour récupérer du sable et du gravier **au Canada**. Les ressources en sable et en gravier au large des côtes du Canada ont été utilisées pour répondre aux besoins de travaux spéciaux réalisés dans la mer de Beaufort, dans la région de Prince Rupert et à l'installation portuaire Roberts Bank près de Vancouver. Dans les provinces de l'Atlantique, les possibilités de délimiter des quantités suffisantes de sable et de gravier à draguer sont bonnes.

- Pierre concassée

De nombreuses entreprises qui produisent de la pierre concassée fonctionnent à temps partiel ou de façon saisonnière, tandis que d'autres sont exploitées comme des filiales de sociétés de construction ou de fabrication non classées dans l'industrie de la pierre.

En outre, certaines installations sont exploitées par des municipalités ou des ministères provinciaux pour leur propre usage. Les carrières où l'on extrait la roche par forage, sautage et concassage sont généralement associées à des travaux réalisés par de grandes sociétés de construction; elles ne servent pas à répondre aux besoins locaux comme c'est souvent le cas des gravières. Selon les coûts et la disponibilité, la pierre concassée fait concurrence au gravier et au gravier concassé comme granulats entrant dans la fabrication du béton et du bitume ainsi que comme ballast pour les voies ferrées et matériaux d'empierrement pour les routes. Dans ces applications, la pierre concassée doit subir les mêmes essais physiques et chimiques que le gravier et le sable.

Dans les provinces de l'Atlantique, les travaux de construction se sont poursuivis à Bull Arm, Trinity Bay (T.-N.), et au gisement pétrolifère extracôtier Hibernia dont le coût est estimé à 5,2 milliards de dollars. Il est prévu que les travaux entrepris sur le système à embase-poids

en béton pour appuyer la plate-forme de forage et de production seront terminés en 1997 et que le forage débutera au cours de l'année suivante.

La société The Newfoundland Resources & Mining Company Limited (NRMC), qui appartient à une filiale de l'Explaura Holdings PLC, a entrepris l'évaluation d'un gisement de calcaire de haute pureté près de son exploitation actuelle de Lower Cove, dans la péninsule de Port-au-Port, à Terre-Neuve. La NRMC prévoit produire des produits spéciaux en collaboration avec sa nouvelle exploitation de granulats conçue principalement en fonction d'expéditions en vrac sur de longues distances. (On peut y accumuler quelque 500 000 t de stocks de réserve, et la capacité de production est d'environ 4,3 Mt/a.) La NRMC envisage de mettre sur pied d'autres terminaux sur la côte est des **États-Unis** qui viendront compléter le terminal qu'elle exploite actuellement à Brooklyn (**New York**).

La province de l'Île-du-Prince-Édouard a conclu à la fin de 1993 un accord avec la Strait Crossing, un consortium de Calgary, pour entreprendre les travaux de construction préliminaires d'un lien fixe de 13,5 km, évalué à 840 millions de dollars, pour relier l'Île-du-Prince-Édouard au Nouveau-Brunswick. On prévoit que les travaux dureront environ cinq ans, à moins de retards imprévus.

Les granulats de granite de la carrière Porcupine Mountain à Aulds Cove, près de Port Hawkesbury (N.-É.), ont été transportés jusqu'aux marchés de toute la région. Ces dernières années, quand il était possible de négocier des conditions avantageuses pour les voyages de retour, des chargements de 50 000 à 60 000 t ont été expédiés aussi loin que Houston (Texas). L'Atlantic Industrial Minerals Incorporated a continué à approvisionner en calcaire la centrale thermique de Point Aconi de la Nova Scotia Power Inc. A partir de son gisement Glen Morrison dans l'île du Cap-Breton. Cette centrale utilise la technologie du lit fluidisé circulant. Étant donné que l'examen des effets environnementaux n'est pas terminé, la Kelly Rock Limited et une entreprise associée n'ont pas encore amorcé le projet d'exploiter sur le littoral une vaste carrière de granulats de construction. Ce projet consiste à mettre en valeur un site en eau profonde au mont Kelly, à environ 40 km au nord de Sydney.

Au Québec, la société Carrières Marconi Ltée, située sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, à Pointe- Noire, près de Sept-Îles, a continué à produire une large gamme de granulats de construction destinés à un vaste marché. Les réserves de gabbro anorthositique sont censées y être très abondantes.

En Ontario, la Dufferin Aggregates (une filiale de la société Ciment St-Laurent Inc.), qui exploite une carrière près de Milton d'une capacité de production allant jusqu'à 7 Mt/a, demeure le plus important exploitant du Canada. Selon la tendance croissante observée dans

l'industrie, on a accordé ces dernières années une attention particulière à la remise en état progressive et continue des sites de la société.

La Manitoulin Dolomite, société appartenant à la Standard Aggregates Inc., exploite des réserves dans

l'île Manitoulin (lac Huron). Environ 2,2 Mt/a de dolomie blanche à grise, à grain fin, sont expédiées vers les marchés de la construction, de l'industrie des produits chimiques et de la métallurgie au Canada et aux États-Unis.

Dans l'Ouest **canadien**, des installations de transport océanique de grande capacité sont utilisées depuis de nombreuses années en Colombie-Britannique pour transporter des granulats de grande qualité ou du calcaire à haute teneur en calcium.

Par exemple, les producteurs de calcaire de l'île Texada, située à environ 100 km au nord-ouest de Vancouver dans le détroit de Georgia, approvisionnent en matériaux bruts les producteurs de ciment et de chaux de la région des basses terres continentales et de l'État de Washington. La Holnam West Materials Ltd. et la société qui l'a précédée expédient des granulats à partir de l'île Texada depuis 1957. Les matériaux d'empierrement pour les routes et la pierraille utilisés dans les basses terres continentales sont également des produits importants; à l'occasion, des commandes spéciales proviennent d'aussi loin que l'Alaska ou le nord de la Californie. L'Imasco Minerals Inc. (l'ancienne International Marble & Stone Co. Ltd.), qui appartient maintenant au Sacks Industrial Group, a continué à produire une large gamme de minéraux utilisés comme matériaux de remplissage et utilisés pour d'autres applications.

SITUATION MONDIALE

L'exploitation de carrières à très grande échelle sur le littoral, où l'on extrait des granulats pour répondre aux besoins des marchés internationaux, continue à susciter beaucoup d'intérêt.

Au Royaume-Uni, les pressions liées à l'environnement et à l'utilisation des terres ont causé une diminution relative de la production à partir des carrières continentales et une production accrue à partir des immenses carrières littorales.

En Irlande, une nouvelle carrière sur le littoral, appelée Wimpey Fleming Adrigole Quarry, a commencé à produire en 1993. La production annuelle devrait passer à 1,2 Mt en 1995 et à 2,0 Mt avant la fin de la décennie. Cette installation ne constitue que la deuxième exploitation de grande envergure de ce type en Europe et l'on prévoit que les marchés du Royaume-Uni et de l'Europe continentale pourront être desservis par un vraquier faisant le trajet de retour. Une exploitation de ce genre et de cette envergure a été mise à l'essai pour la première fois en

1986 par la Foster Yeoman Ltd. à sa carrière Glensanda sur la côte ouest de l'Écosse. L'exploitation Glensanda a été suivie par celle de l'entreprise en participation Vulcan Materials Co. dans la péninsule du Yucatan au Mexique ainsi que par un vaste projet, décrit antérieurement, de la société The Newfoundland Resources & Mining Company Limited (NRMC).

La Tarmac plc est en train d'aménager une carrière littorale de 5 Mt/a à Jossingfjord **en Norvège**, tandis que la Schweden Splitt AB met en valeur une carrière de granite près de la côte sud de la Suède, principalement pour les marchés de Berlin et de ceux des rives de la mer Baltique en Allemagne. La Redland Aggregates Ltd. a pour sa part retardé la mise en exploitation d'une vaste carrière littorale dans l'île South Harris en Écosse. Il semble que le projet aurait des incidences inacceptables sur l'environnement dans une zone naturelle de beauté remarquable.

L'extraction de granulats dans le fond océanique est actuellement la principale activité minière océanique liée aux minéraux non combustibles.

Au Japon, le sable marin représente environ 40 % de la production intérieure totale de granulats fins nécessaires à la fabrication du béton. La tendance générale est d'accorder plus d'intérêt aux projets de dragage de granulats au large des côtes à cause de la croissance de la demande et de diverses contraintes en matière de protection de l'environnement et de zonage qui s'exercent sur les gisements se trouvant à l'intérieur des terres. Cela est particulièrement vrai aux États-Unis, même si plusieurs facteurs ont contribué à rendre difficile l'élaboration d'une loi sur l'exploitation sous-marine qui atténuerait les principales inquiétudes de l'industrie et des milieux de la protection de l'environnement.

UTILISATIONS

Le sable et le gravier sont surtout utilisés pour construire des routes et comme granulats dans le béton et l'asphalte. Selon une étude récente effectuée par le ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, la construction de maisons unifamiliales crée une demande d'environ 300 t de granulats par unité, tandis que la construction d'immeubles à logements n'en exige que 50 t environ par unité.

L'industrie de la construction consomme plus de 90 % de la production totale de pierre sous forme concassée. Cette pierre est utilisée principalement dans le béton et l'asphalte, pour construire des routes et des voies ferrées ainsi que pour diverses autres utilisations, par exemple comme remblai de construction. Les spécifications varient beaucoup selon les applications prévues et de nombreux essais sont nécessaires pour déterminer si les granulats conviennent à certaines utilisations. Il est également important de mener des essais pour

déterminer la présence d'impuretés organiques ou d'autres matières nuisibles, pour mesurer la résistance des granulats à l'abrasion et aux cycles de gel et de dégel ainsi que pour évaluer les effets de la dilatation thermique, de la porosité et de l'absorption, de la réactivité aux matériaux associés et de la texture superficielle. L'emploi de béton léger dans la construction d'immeubles commerciaux et institutionnels a facilité la construction de bâtiments plus hauts ainsi que de ponts et d'immeubles de plus longue portée nette. L'utilisation de granulats légers offre des avantages supplémentaires : ils confèrent au béton des propriétés d'isolation thermique et acoustique, une résistance au feu, une bonne résistance aux cycles de gel et de dégel et une faible capacité d'absorption d'eau. La production et l'utilisation des granulats légers sont régies par les normes de l'American Society for Testing and Materials (ASTM). Ces normes sont les suivantes : ASTM C 332-91 – Lightweight Aggregates for Insulating Concrete; C 330-89 – Lightweight Aggregates for Structural Concrete et C 331-89 – Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units.

PERSPECTIVES

En 1995, les expéditions de granulats devraient augmenter modérément, si l'on se base sur la poursuite de la vigueur du secteur des travaux de génie. Par ailleurs, les mises en chantier demeureront à environ 156 000 dans le secteur de la construction résidentielle, d'après la Société canadienne d'hypothèques et de logement. Les travaux de génie continueront à profiter du programme fédéral de renouvellement des infrastructures, à frais partagés entre les trois paliers de gouvernement. On prévoit une reprise plus lente dans le secteur de la construction non résidentielle, étant donné les taux d'inoccupation relativement élevés des immeubles à bureaux et des bâtiments industriels.

Dans les provinces de l'Atlantique, la mise en valeur du champ pétrolifère Hibernia au large des côtes et la construction prévue d'un lien fixe qui relierait l'Île du-Prince-Édouard au Nouveau-Brunswick pourraient voir leurs besoins en matériaux de construction de base atteindre leur maximum en 1995 et 1996, respectivement.

La demande de granulats aux États-Unis devrait grimper d'environ 4 % en 1995, grâce surtout aux augmentations enregistrées dans les secteurs des installations institutionnelles et des travaux publics; la hausse de la construction résidentielle devrait être modérée. De plus, les perspectives pour la construction d'immeubles à bureaux et de bâtiments industriels devraient s'améliorer.

La demande de granulats découlant d'importants travaux de construction s'est beaucoup accrue en raison de l'expansion urbaine. Paradoxalement, cette expansion urbaine a non seulement envahi les carrières, les sablières et les gravières, mais elle a également envahi des

régions où se trouvent des réserves et des ressources prometteuses. Dans ce contexte, et compte tenu des progrès accomplis dans les techniques de remise en état, les zonages municipaux et régionaux deviendront probablement plus coordonnés et équilibrés en ce qui concerne la planification et la gestion des terres.

Dans de nombreux secteurs, le sable et le gravier continueront à rivaliser avec la pierre concassée et, dans certaines utilisations, avec les granulats légers. On s'attend à localiser et à évaluer de nouvelles réserves dans les processus de planification urbaine et de zonage régional. Les prix des granulats continueront à croître en raison de l'appréciation des terrains, du recours à des techniques et à de l'équipement d'exploitation plus complexes, de l'épuisement des réserves facilement accessibles et des dépenses supplémentaires résultant de la remise en état des sites.

Les estimations indiquent que les sablières et les gravières actuelles dans certaines régions seront épuisées d'ici la fin de la décennie, ce qui forcera à exploiter des gisements éloignés. Les pénuries prévues pourraient inciter à exploiter des gisements au large des côtes et même à extraire des granulats par exploitation souterraine dans certaines régions.

2-3 Influence du ciment :

L'importance des propriétés normalisées des ciments courants tient à leurs relations, plus ou moins directes, avec les propriétés du béton. Ces dernières dépendent évidemment aussi de nombreux autres paramètres, ce qui oblige à fixer les autres constituants et leurs proportions.

Le ciment est l'élément qui a la plus grande influence sur la qualité du béton.

On peut étudier l'influence des ciments selon leur quantité (dosage) et leur qualité.

2-3-1 Nature ou type du ciment :

Selon sa composition, le ciment appartient à un type ou à un autre. La régularité de la composition assure la régularité de la performance du béton vis-à-vis de la durabilité, toutes les autres caractéristiques du béton étant égales par ailleurs. [19].

Une étude expérimentale de VENUAT (figure 2.1) montre l'évolution des résistances en compression d'un béton gâché avec trois ciments de natures différentes.

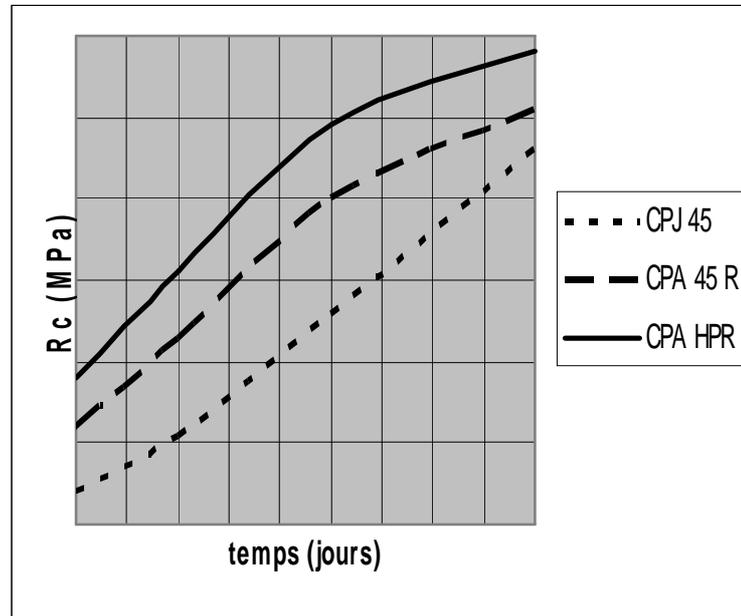


Figure 2.1 : Influence de la nature du ciment

D'après VENUAT, plus la teneur en silicate tricalcique (alite) est élevée, plus le ciment est résistant surtout au jeune âge.

2-3 -2 Finesse des ciments :

L'influence des grains fins du ciment est importante aux premiers jours. Ces grains fins (<10 μm) sont plus riches en aluminat tricalcique (ce qui accentue la résistance) et s'hydratent plus vite. Pratiquement les résistances croissent linéairement en fonction de la finesse de mouture aux premiers âges et jusqu'à 7 jours. Au-delà, l'influence de la finesse devient relativement moins importante. La figure 2-2 représente l'évolution de la résistance en compression d'un béton en fonction de la finesse du ciment [19].

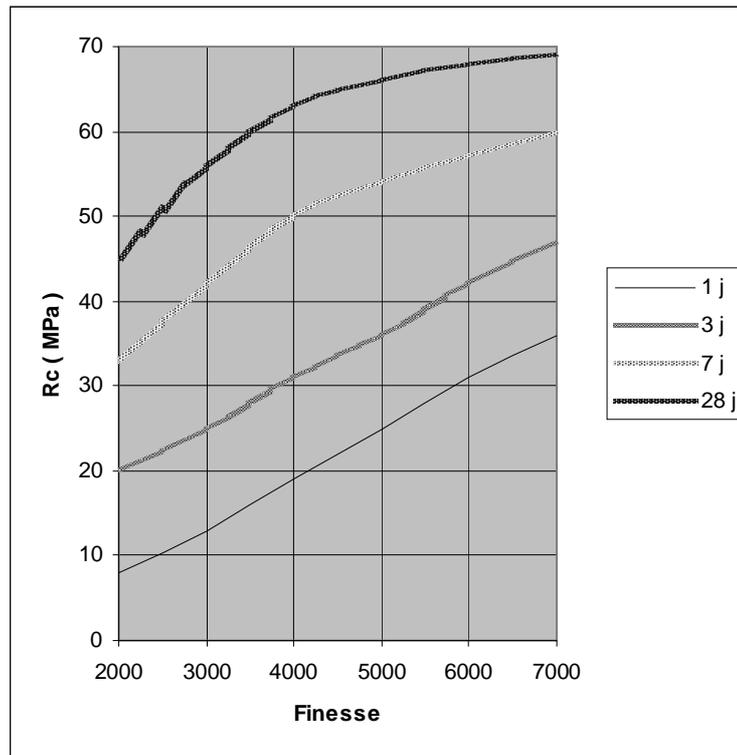


Figure 2-2 : Influence de la finesse des ciments.

2-4 Résistance mécanique à la compression suivant la classe du ciment : [20]

L'une des qualités essentielles à rechercher pour un béton est sa résistance mécanique à la compression.

L'essai est effectué sur éprouvettes cubiques (10x10x10 cm³) en tenant compte des deux modes de conservations suivants :

- Env1 : l'air ambiant du laboratoire ($T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=45\pm 10\%$)
- Env2 : Cure dans l'eau pendant 28 jours à $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$.

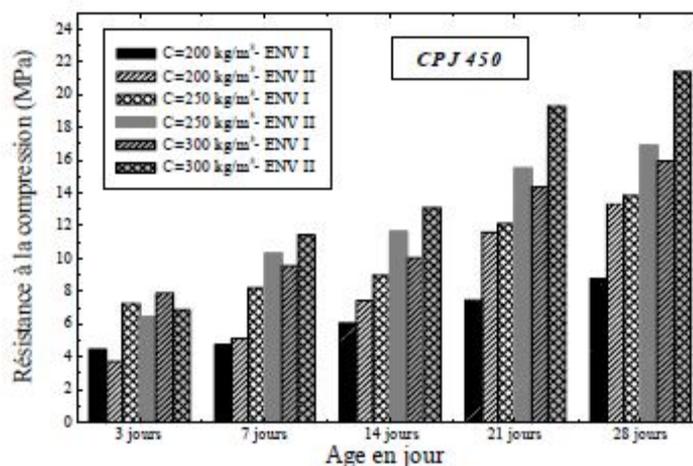


Figure 2-3. Evolution de la résistance à la compression du béton de classe CPJ450 (CPJ42 ,5) en fonction de temps [20]

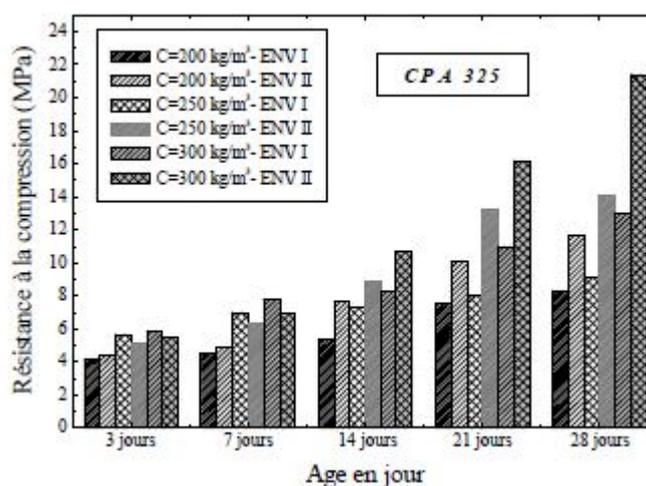


Figure2-4. Evolution de la résistance à la compression du béton de classe CPA 325 (CPA32 ,5) en fonction de temps. [20]

Les figures 2-3 et 2-4 représentent sous forme d’histogrammes les résultats de la résistance à la compression à différents ages de durcissement pour les deux classes de ciment.

Ces résultats montrent que la résistance à la compression augmente en fonction de l’âge de mûrissement. On a pu remarquer qu’au jeune age (≤ 3 jours) les bétons conservés dans l’Env1 Possèdent des résistances supérieures à celles des bétons conservés dans l’Env2. Par contre, au delà de 3 jours, le phénomène inverse est observé pour la majorité des bétons. La cure humide a tendance à augmenter la résistance à la compression par rapport à l’Env1. Celle-ci procure au béton un gain de résistance à la compression de l’ordre de 18 à 34% pour un ciment CPJ 450(CPJ42 ,5) et de 27% à 35% pour un ciment CPA 325(CPA32 ,5).

2-5 les notions actuelles de l'influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés du béton. [2]

Comme le montrent plusieurs recherches, les caractéristiques des granulats, telles que la structure, la déformabilité, la résistance de la roche d'origine ainsi que la forme et l'état de surface influent considérablement sur les propriétés du béton. [Gordon S.S – Izkovitch S.M]

Au cours du choix des granulats pour la fabrication des éléments en béton armé il est nécessaire de résoudre des problèmes compliqués concernant la dépendance des indices technico-économiques des produits finis des types de matériaux utilisés aussi bien que des facteurs organisationnels et économiques.

On sait qu'il est raisonnable d'augmenter la teneur en granulats dans la composition du béton, surtout la teneur en granulats concassés ou roulés.

On y vient en augmentant la dimension maximale des gros granulats, en les séparant en classes, et en choisissant bien un tel rapport r entre les dosages en sable et en gros granulat qui assure la maniabilité requise du béton, frais.

La composition granulométrique se caractérise par le rapport G/S, la dimension maximale D_{max} le nombre de fractions et leur teneur dans la masse totale des granulats ainsi que la continuité de la granulométrie.

2.5.1 Influence du squelette granulaire G/S sur la maniabilité des bétons

Les caractéristiques du béton peuvent en fait être plus importantes. Il s'agit de propriétés étroitement dépendantes de conditions purement locales, telles les propriétés de ses constituants, ainsi que les propriétés à son état frais (maniabilité, densité, air occlus, retrait) [4] [5] [6]. Des propriétés ayant des incidences directes sur d'évidentes qualités non moins importantes, telles la perméabilité et la durabilité.

Au fur et à mesure de l'augmentation du dosage en sable, dans le mélange des agrégats, le prix total des agrégats diminue car le sable coûte en général quelque fois moins cher que les gros granulats. Mais en même temps la surface des agrégats augmente ce qui provoque l'augmentation du besoin en eau et de la dépense en ciment dans le béton frais. Les distances entre les grains de sable diminuent tandis que celles entre les grains de gros granulats augmentent.

On peut conclure que le rapport G/S influence sur la résistance du mortier dans le béton. La variation de la résistance est due à l'écartement des grains de sable sous l'action de la pâte de ciment et à l'écartement des grains des gros granulats provoqué par l'action du mortier de béton.

Les essais des chercheurs [Veriguin K.P, Minas A. I] montrent que la dimensions moyenne des intervalles entre les grains de sable dans le béton a base de gros granulats dont:

$D_{max}=20\text{mm}$, $E/C = 0,4$, I.v. . 30 à 40 secondes et $G/S = 0,2$ à $0,5$

varie selon le type de sable comme suit:

- pour les sables fins de 17 a 65μ
- pour les sables moyens de 20 à 100μ
- pour les sables gros de 32 à 200μ

La distance moyenne entre les grains des gros granulats dans ces bétons varie:

- pour les sables fins de 2 à 18 mm
- pour les sables moyens et gros de 1 à 17 mm

La résistance maximale correspond à la distance entre les grains des gros agrégats égale 3 à 5mm. On note que la dimension moyenne de la distance entre les grains voisins du sable pour les sables divers varie dans les limites de 40 à 100μ).

Dans l'ouvrage [3] , La composition de base des bétons utilisée est celle de Dreux-Gorisse [10] [11] [12], Le dosage en ciment est pris égal à 350 kg/m^3 , pour tous les bétons.

Le béton B5 réalisé à base de granulats concassés (carrière HEDNA Ain Smara), est un mélange de quatre classes granulaires (0/3, 3/8, 8/15 et 15/25).

Le béton B6 réalisé à base de granulats concassés, un mélange binaire (0/3 et 8/15). Le béton B7 réalisé à base de granulats roulés, un mélange binaire (0/1 et 5/20). Et enfin, le béton B8 à base d'un mélange de sable (0/3 concassé + 0/1 roulé) et graviers concassés (8/15).

Les mesures de maniabilité effectuées ne sont pas faites en vue d'une éventuelle comparaison des différents bétons entre eux, car les quantités d'eau introduites sont différentes. Mais ces mesures permettent une appréciation de chaque type de béton séparément, et ce en fonction du rapport G/S.

Le comportement du béton B5 représenté sur la figure 2.5, se caractérise par un optimum très clair et assez pointu correspondant à la valeur $G/S = 1.6$, et qui offre le meilleur temps LCL (7 secondes) pour un dosage en eau gardé constant. Par ailleurs, le rapport $G/S = 1.6$ obtenu correspond à la tendance actuelle qui est celle sacrifiant légèrement la résistance au profit de l'ouvrabilité (valeurs entre 1.5 à 1.6) [10]. C'est un mélange continu contenant toutes les classes granulométriques, le module de finesse du sable utilisé étant considéré correct ($MS = 2.57$). On notera aussi que la courbe obtenue est assez étendue entre les valeurs de G/S comprises entre 1.2 et 2.0, offrant ainsi un large choix de proportions graviers/sable correspondant à des temps LCL intéressants (7 à 8 secondes).

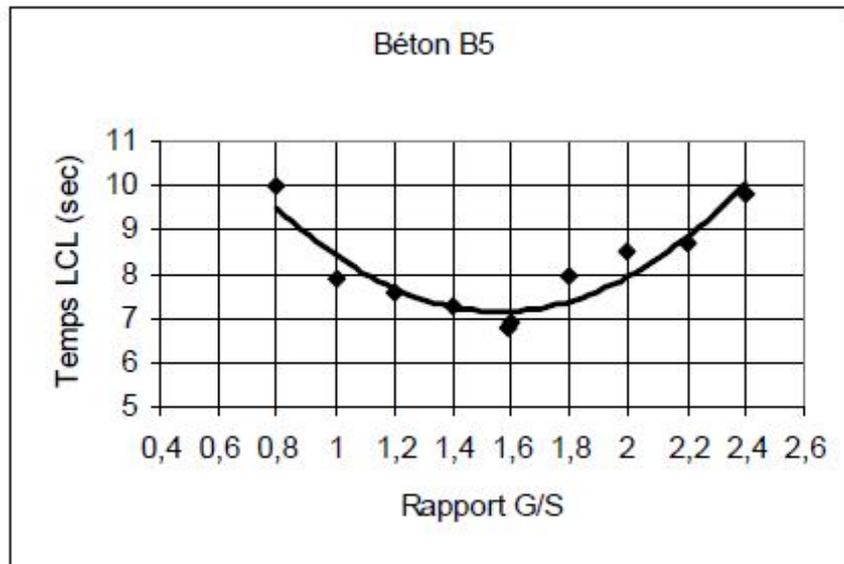


Figure 2.5 : Influence du rapport G/S sur la maniabilité LCL des bétons B5 (à base de granulats concassés) [3]

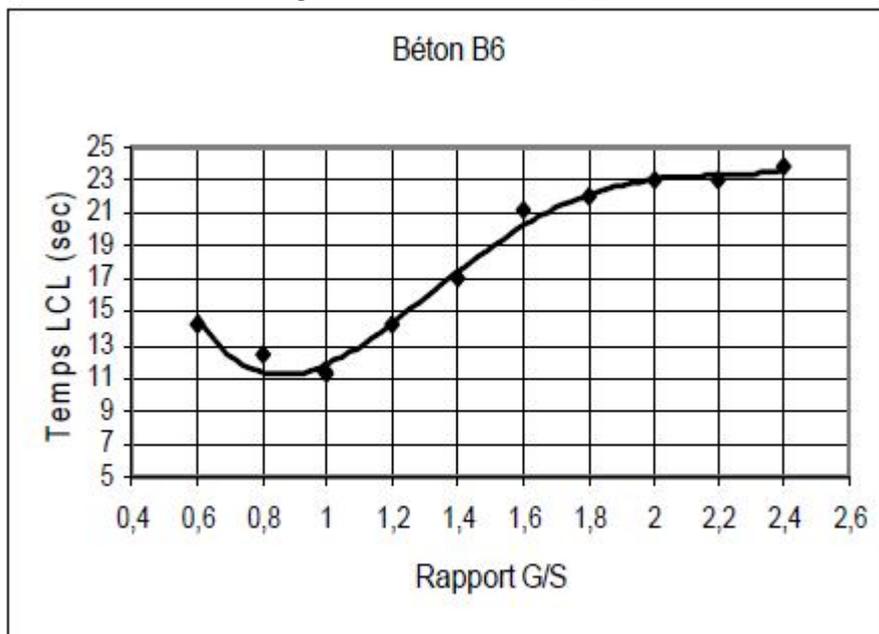


Figure2. 6 : Influence du rapport G/S sur la maniabilité LCL des bétons B6 mélange binaire à base de granulats concassés [3].

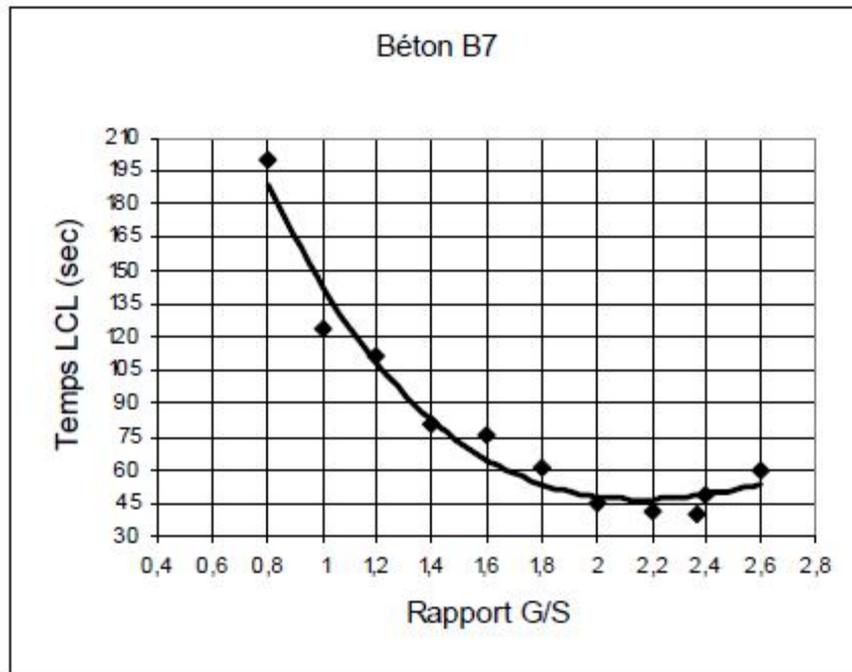


Figure 2.7 : Influence du rapport G/S sur la maniabilité LCL des bétons B7 à base de granulats roulés [3]

Le béton B6 est obtenu par un mélange binaire de granulats concassés (sable 0/3 et gravillons 8/15). La courbe obtenue présente une double courbure avec un temps LCL minimum (11 secondes) correspondant à la valeur $G/S = 1$ (figure 2.6). C'est un mélange offrant un champ de possibilités de choix de rapports G/S assez réduit.

Ceci est probablement dû au fait de la discontinuité du mélange qui chercherait à réduire sa porosité globale par un volume d'éléments fins plus important (ici les valeurs G/S présentant les meilleurs temps LCL sont inférieurs à 1).

Le béton B7 est un mélange de deux classes granulaires (0/1 et 5/20) à base de granulats roulés. La valeur optimale correspond à $G/S = 2.37$ obtenue pour un temps LCL égal à 40 secondes (figure 2.7). C'est un béton sec avec une mauvaise ouvrabilité. Ceci est probablement dû à la qualité médiocre du sable utilisé qui est un sable trop fin (module de finesse égal à 1.3) situé en dehors des fuseaux préférentiels recommandés [10].

Pour le béton B8 obtenu à base d'un mélange de granulats concassés et roulés (sable 0/1, sable 0/3 et gravillons 8/15), le rapport optimum $G/S = 2$ correspond à un temps LCL égal à 30 secondes. La courbe correspondante (figure 2.8) est étendue entre les valeurs G/S comprises entre 1 et 2.2 correspondant à des temps LCL compris entre 30 et 40 secondes. Néanmoins, la valeur du temps LCL 30 secondes constitue la limite supérieure relative à la qualité de l'ouvrabilité [10]. Probablement ce sont les éléments trop fins, gros consommateurs d'eau qui

sont à l'origine de la médiocrité de l'ouvrabilité des bétons obtenus. Le choix de possibilités du rapport G/S se trouve donc très restreint.

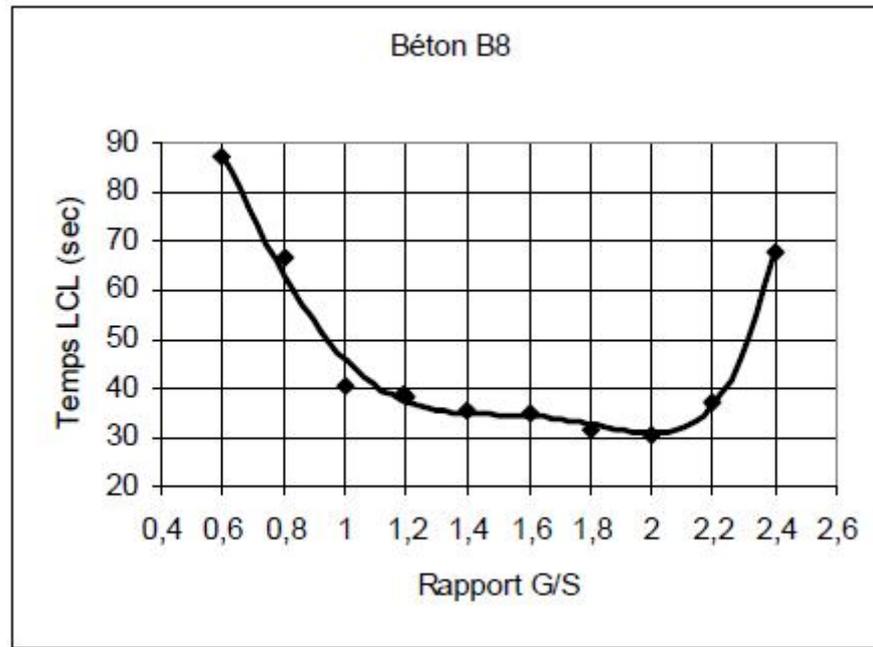


Figure 2.8 : Influence du rapport G/S sur la maniabilité LCL des bétons B8 mélange binaire à base de granulats concassés et roulés [3]

À travers les résultats des essais portant sur une large variété de bétons (à base de granulats concassés à granulométrie continue, à base de granulats concassés à granulométrie discontinue, à base uniquement de granulats roulés et à base de granulats mixtes concassés-roulés), constitue une des réponses aux attentes des praticiens de la région. Les différents résultats concernant la maniabilité, le squelette granulaire optimum, la densité et le pourcentage d'air occlus, de la variété des bétons, seront sans aucun doute d'un grand intérêt pour des prises de décision quant au choix des matériaux, des formulations, des propriétés des bétons attendues, etc...

BOUTAMINE.S -KHARCHL.F [9], dit que la proportion relative de sable et de gravier doit être telle que le béton présente une homogénéité satisfaisante sans aucun risque de ségrégation. L'influence sera jugé par le rapport G/ S. Il a été constaté selon les expériences entreprises que :

a) Plus G/S est élevé, plus le béton présentera des résistances mécaniques élevées par contre présente des difficultés de mise en oeuvre par manque d'ouvrabilité

b) Pour un béton très plastique : riche en mortier , de bonne ouvrabilité donnant des paramètres de bonne apparence avec mise en oeuvre facile mais ne permettant pas des résistances exceptionnelles on prendra

$$1.5 < G/S < 1.7$$

C) Pour un béton normal : du béton armé courant, de plasticité variable en fonction du dosage en eau, mise en oeuvre facile et donnant de bonnes résistances

$$1.8 < G/S < 2$$

c) Pour un béton à forte compacité de consistance ferme présentant des résistances élevées mais sujettes à ségrégation

$$2 < G/S < 2.2 \text{ et exceptionnellement } 2.4$$

LA tendance actuelle est de ne pas dépasser en générale des valeurs de G/S de 1.5 à 1.6 léger sacrifice de la résistance au profit de l'ouvrabilité.

Kaddour CHOUICHA[14],a conclu que l'utilisation de la dimension fractale et de l'étendue granulaire nous permet effectivement d'identifier non seulement chaque courbe granulométrique mais aussi le mélange granulaire au sens où nous pourrions déterminer sa porosité-compacité.

La compacité-porosité des mélanges granulaires n'étant pas une propriété intrinsèque mais dépendante des grains (masse volumique, forme, étendue granulaire, etc....) ainsi que de la mise en oeuvre (paramètres du serrage, forme et dimension de l'éprouvette, etc....)

La recherche du mélange optimal devient simple sinon triviale puisque cela se ramène à utiliser pour tous les mélanges granulaires celui dont la valeur de la dimension fractale est égale à 3 ou lui est très proche. En outre les relations développées indiquent clairement l'importance du rapport d/D puisque l'utilisation d'une grande étendue granulaire (diminution du rapport d/D par adjonction de fines ou de gros grains) participe à la réduction de la porosité, et ce en interaction avec le mode de mise en oeuvre

2.5.2 Influence du squelette granulaire s/g sur la résistance des bétons

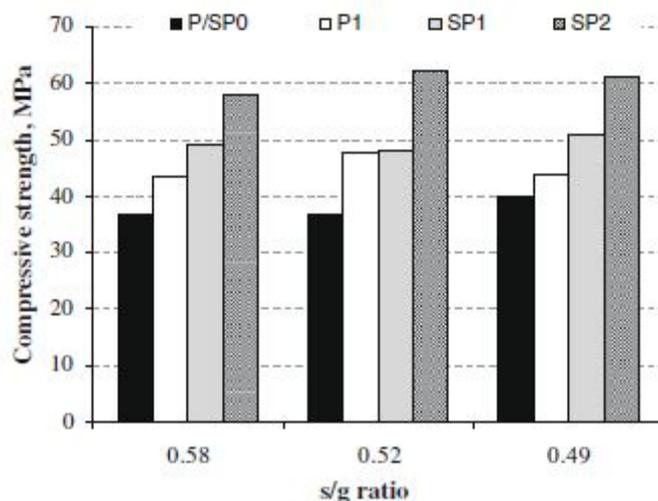


Figure 2.9 : Effet de la proportion s/g sur la force compression. [17]

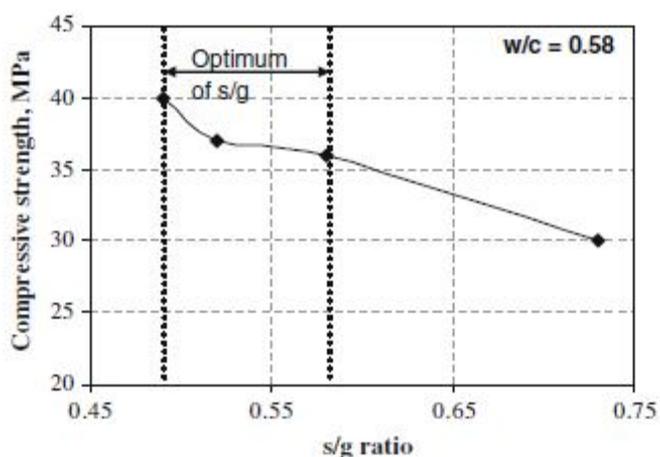


Figure 2.10 : Développement de force compression par rapport a la proportion s/g. [17].

Mohammed Seddik, Meddah a, Salim Zitouni b [17], on distingue que la proportion de sable/gravier (s/g) peut aussi illustrer l'effet du contenu global grossier comparé à l'ensemble excellent sur le développement de la force de compression de mélange du béton. La Figure 2.9 montre le développement de la force de compression par rapport à la proportion s/g. Cela peut être observé que dans les valeurs aux limites de 0.58 à 0.49, le s/g n'a aucun effet significatif sur la force de compression. Cependant, en diminuant le e/c par l'addition de différentes dimensions, l'effet du s/g devient plus perceptible. Les résultats ont indiqué que les dimensions d'ensembles tant grossiers qu'excellents devraient être optimisées. Quant aux paramètres de mélange et les propriétés mécaniques prévues. Le s/g peut représenter un des paramètres qui pourraient permettre un meilleur ajustement et un fait de proportionner

du squelette granulaire, du mélange de béton. En fait, la superficie d'ensemble (sable + gravier) et particulièrement celui de l'ensemble grossier devrait être proportionné selon le ciment contenu et sa superficie. Les résultats obtenus ont montré que la valeur optimum du s/g qui peut offrir le plus haut Degré de compacité du squelette granulaire et par conséquent La force de compression la plus haute peut s'étendre entre 0.45 et 0.58 comme indiqué dans **Figure 2.10**. Au delà de cette valeur, une diminution significative de la force de compression pourrait être observée. Cela pourrait indiquer que le contenu global grossier devrait être plus important que celui de l'ensemble excellent.

2.5.3 Grosseur maximale des gros granulats.

Le choix de la grosseur maximale des gros granulats dépend de différents facteurs tels que les dimensions des éléments façonnés, le degré de ferrailage, la disposition de l'armature etc Le savant français **Mr DREUX.G** propose les dépendances suivantes en fonction des dimensions maximales des granulats D_{max} . [15]

En fait, l'appréciation de l'influence de la grosseur maximale des agrégats comme étant le seul paramètre variable entraîne de grandes difficultés car ce ne sont pas uniquement les propriétés des grains des gros granulats qui changent mais aussi la composition du mélange de béton ainsi que les dimensions des éprouvettes.

Et malgré les difficultés citées, des recherches se sont développées dans cette direction dans divers pays.

En U.R.S.S. les essais ont été réalisés où la dimension des morceaux de pierres concassées a été la seule variable. Comme modèle on a pris les boulets en acier polis de diamètre 5 ; 10 et 25 mm. La résistance du béton des éprouvettes cubiques d'arrête 10 cm a été respectivement égale à 392 ; 352 ; et 276 kgf/cm^2 . [16]

D'après ces résultats il a été conclu qu'au cours de l'augmentation de la grosseur des gros granulats de haute résistance dans le béton à composition granulométrique discontinue la résistance du béton diminue.

Aux Etats-Unis des recherches sur l'influence de la grosseur des gros granulats sur la résistance du béton ont été réalisées lors de la construction du barrage Boldouer. Les résultats de ces recherches sont présentés au tableau n° 1. Ces résultats montrent qu'au cours de l'augmentation de D_{max} des gros granulats de 10 à 230 mm la dépense en sable dans le béton diminue en volume absolu de 0,45 à 0,210 tandis que le contenu de gros granulats augmente de 0,136 à 0,6 . Pour les gros granulats de dimensions constantes la résistance du béton augmenterait, mais en pratique elle ne change pas d'où on peut

conclure que l'utilisation des gros granulats de grandes dimensions au lieu des gros granulats fins diminue la résistance du béton.

Avec l'augmentation D_{max} des gros granulats la dépense en ciment a diminué de deux fois pour les bétons de même résistance. Donc, dans les conditions considérées l'augmentation de D_{max} accompagnée de la variation de la composition du béton est efficace. D'après les auteurs des recherches, l'accroissement de D_{max} est avantageux pour les bétons hydrauliques de résistance modérée, car l'abaissement du dosage en ciment mène à la diminution du dégagement calorifique au cours de l'hydratation du ciment et, donc à l'augmentation de la résistance à la fissuration.

D'autres résultats de recherche concernant l'influence de la grosseur des gros granulats sur la dépense en ciment pour les bétons de même résistance et de même plasticité sont présents dans les ouvrages **A. Remadnia [2]**.

On indique que l'abaissement de la résistance à cause de l'augmentation de la grosseur des gros granulats se manifeste plus fort dans les bétons de haute résistance.

Pour les bétons maigres de classes faibles fabriqués à base de mélanges de mêmes résistances et mêmes ouvrabilités, il est plus avantageux d'utiliser les gros granulats de grosseur maximale tandis que pour les bétons gras de haute résistance il vaut mieux utiliser les granulats de petites dimensions. On présente les résultats des essais de 56 compositions des sables et des granulats de différentes carrières des U.S.A.

Tableau :2.1 Influence de la grosseur des gros granulats sur la résistance du béton :

E/C	D _{max} En mm	A.C . En cm	Dépense en matériaux pour Im ³					Démén : des éprouvettes s cylin en cm	R _{28j} en Kgf/cm ²
			Pâte de ciment en l	Sable en l	Gravier en l	Ciment en l	Eau en l		
0.54	230	7.5	190	210	600	227	123	92× 183 61× 122 49 ×92	217 204 231
0.54	150	7.5	206	214	580	240	130	92× 183 61 × 122 46 × 92	224 212 220
0.54	75	9.5	238	255	507	275	149	92 × 183 61 × 122 46 × 92	233 229 231
0.53	40	12.7	283	306	411	334	177	61 × 122 30 × 61 15× 30	239 252 262
0.55	20	21	350	370	280	396	216	61× 122 15 × 30 7.5 × 15	225 264 283
0.54	10	23	410	454	136	480	259	15× 30 7.5 × 15	250 276

La grosseur maximale des gros granulats a varié de 20 à 40 mm, pourtant on a remarqué que les variations des propriétés des gros granulats pouvaient influencer considérablement sur la résistance du béton par comparaison à un faible changement de la grosseur maximale.

Parmi les 56 types de gros granulats utilisés, 21 échantillons renferment du quartz comme constituant principal, 20 échantillons sont de préférence à base de calcaire et les quatre autres contiennent du quartz et du calcaire en proportion égales. Les gros granulats à base de calcaire ont provoqué l'augmentation de la résistance du béton de 7% en moyenne par rapport aux bétons à base de gros granulats quartzeux.

La variation de la résistance due à l'influence du type des granulats est beaucoup plus significative que celle due à la variation de leurs dimensions. Les résultats expérimentaux obtenus par d'autres chercheurs concordent seulement pour les granulats de dimensions entre 10 et 20 mm. Pour ces, granulats, la résistance du béton appartenant à l'intervalle 170 à 500 kgf/cm² ne dépend pas de la grosseur des granulats.

2.5.4 : La composition granulométrique des gros granulats

Une bonne granulométrie du granulat doit assurer la diminution du volume des vides entre les grains. Aux usines de préfabrication on emploie des granulats dont les dimensions sont subordonnées aux normes en vigueur françaises et soviétiques

Tableau :2.2 fraction granulometrique utilisees par les normes françaises et soviétiques:

Normes soviétiques	Normes françaises
granulats de 5 a 10 mm	granulats de 6,3 a 10 mm
granulats de 10 a 20 mm	granulats de 10 a 20 mm
granulats de 20 a 40 mm	granulats de 20 a 31,5 mm
granulats de 40 a 70 mm	granulats de 31,5 a 40 mm
	granulats de 40 a 63 mm
	granulats de 63 a 80 mm

La composition granulométrique des gros granulats dans le béton varie dans de larges limites à cause des différents contenus de chaque fraction. Il est nécessaire de savoir comment de telles variations peuvent influencer sur les propriétés du béton et la dépense en ciment. L'expérience montre que les variations du contenu modère de telle ou telle fraction dans les limites 15 à 20 % en masse n'influe que peu sur les paramètres et les propriétés du béton; ces variations de 1,5 à 3 fois mènent à une forte valeur de cette influence.

A. Remadnia [2], On considère les trois exemples suivants :

- la composition granulométrique des gros granulats avec la contenance abaissée (par rapport à l'optimum) de la plus grande fraction , ces essais montrent qu'une telle composition granulométrique entraîne une dépense élevée en ciment mais elle n'influe presque pas sur la résistance du béton.

- Accroissement du contenu d'une fraction quelconque : si la teneur en fraction maximale augmente alors la résistance la ségrégation et à la sédimentation diminuent, la maniabilité et la capacité à l'expédition s'aggravent

-L'augmentation brusque du contenu de la fraction intermédiaire provoque l'écartement des morceaux de la plus grande fraction et la compacité de la disposition des granulats de toutes les fractions dans la structure du mélange de béton ; ce qui provoque soit un excès dans la dépense en ciment, soit l'abaissement de la maniabilité.

2.5.5 L'influence de la composition granulométrique discontinue :

On utilise des agrégats à composition granulométrique discontinue pour diminuer le dosage en ciment sans changer les propriétés de béton, notamment sa résistance et son ouvrabilité.

L'analyse montre que la discontinuité provoque la ségrégation du mélange de béton qui augmente au cours de l'augmentation de maniabilité.

On sait que la ségrégation détériore la structure du béton, par contre si celle-ci n'aura pas lieu la résistance du béton ne change pas même dans le cas de la granulométrie discontinue. Pour l'éviter il est recommandé d'utiliser les mélanges secs avec l'affaissement du cône d'Abrams égal à zéro. On prépare ce mélange à base de sables moyens et gros.

2.5.6: la granulométrie du sable

La granulométrie du sable a une grande importance pour la qualité des bétons. Une bonne granulométrie du sable permet d'économiser le liant sans réduire la résistance mécanique du béton. La granulométrie du sable doit assurer :

- d'une part un volume minimal des vides entre les grains.
- une surface spécifique minimale des grains.

L'analyse réalisée a été consacrée à la mise en évidence de l'influence de la composition granulométrique du sable sur les propriétés du béton et des mélanges de béton. d'après l'analyse expérimentale on voit que lorsque les intervalles entre les particules de sable sont petits, ils peuvent être remplis partiellement d'air ou d'eau mais ils ne se remplissent pas de pierre de ciment, ce phénomène abaisse la résistance au gel et la résistance du béton ainsi que son étanchéité. **Gorisse . F [12].**

La granulométrie continue du sable améliore les propriétés rhéologiques du béton frais telles que la plasticité, la résistance à la ségrégation et à la sédimentation. La granulométrie du sable est appréciée à l'aide du tamisage

- Les grains de sable dont les dimensions s'approchent de celles du ciment jouent en réalité le rôle d'adjuvants minéraux actifs ou inertes en fonction de leur composition minéralogique et du régime de durcissement.

Le sable dont les dimensions dépassent 50 μ , peut être considéré comme un vrai agrégat. On recommande de séparer les fractions inférieures à 0,15 mm en deux ou trois fractions, par exemple :

- la fraction 0 à 50 μ
- la fraction 50 à 100 μ
- la fraction 100 à 150 μ

Pour préciser l'influence de la granulométrie du sable sur la résistance du béton et la consommation en ciment, **Mr Gordon** a étudié les sables de granulométries diverses; cet auteur a conclu que la granulométrie du sable de 0,15 à 5 mm n'influe pas sur la résistance du béton si sa composition est optimale.

D'autres chercheurs ont aussi confirmé cette conclusion.

On souligne que lorsqu'on remplace un sable par un autre et que cela fait varier la résistance du béton, la cause ne consiste pas en granulométrie. Il faut la chercher et dans d'autres facteurs tels que: la composition du béton, son ouvrabilité, le coefficient de compactage du béton frais, la composition minéralogique et forme des grains ainsi que leur propriété.

Le facteur de grande importance est la dépense en ciment qui dépend beaucoup de la granulométrie du sable. Le béton préparé à base de sable moyen exige une dépense minimale en ciment. Le besoin en eau et la dépense en ciment augmentent de 8 à 20 % quand on utilise le sable fin: pour le sable gros cette augmentation est insignifiante. Le fait que l'utilisation des gros sable mène un petit excédent de dépenses en ciment peut être expliqué, par le contenu diminué de la fraction inférieure à 0,6 mm

Dans ces sables, ce qui influe négativement sur l'ouvrabilité du béton frais. Les sables fins augmentent la surface spécifique totale ce qui exige aussi l'augmentation de la dépense en pâte de ciment dans les mélanges de béton de même maniabilité. Il convient de noter que les auteurs précédemment cités indiquent qu'au cours de la réalisation des recherches de l'influence de la granulométrie du sable sur la résistance du béton, il n'était pas possible de sélectionner la granulométrie des sables comme l'unique variable car la variation de la composition est aussi nécessaire.

2.5.7 : Forme des agrégats et état de leur surface

Pour faire l'analyse quantitative de l'influence des paramètres géométriques des agrégats sur les propriétés du béton, **Gorisse . F [12]**, recommande d'utiliser le coefficient volumétrique afin de tenir compte de la forme des granulats.

Donc afin de déterminer le relief d'un morceau de granulat, il est nécessaire de savoir sa surface totale, son volume V et ses dimensions.

Pour d'apprécier le caractère du relief de la surface, qui influe sur la cohésion entre les grains du granulat et la pierre de ciment. On a proposé la classification des gros granulats, selon la forme ils se subdivisent en :

- granulats cubiques (avec le rapport de la longueur à l'épaisseur inférieur à 2)
- granulats irréguliers (dont le rapport de la longueur à l'épaisseur varie de 2 à 3)
- granulats anguleux (avec le rapport de la longueur à l'épaisseur supérieur à 3)

Quelques chercheurs indiquent le rôle négatif des agrégats lamelleux sous forme d'aiguilles dont l'utilisation diminue la résistance et augmente la dépense en ciment.

Mr L'Hermite ne permet l'utilisation des gros granulats sous forme d'aiguilles et de plaques lamelleuses qu'en faible quantité.

En procédant à un bon compactage on peut obtenir des bétons avec des caractéristiques mécaniques élevées en utilisant des agrégats sous forme de lamelles. Quelques auteurs proposent l'addition dans la composition 30% des agrégats sous forme d'aiguilles. La présence de morceaux en aiguilles en grande quantité (supérieure à 50 %) entraîne des difficultés au cours du compactage du béton provoquant ainsi l'abaissement de la résistance mécanique du béton.

En fait, on indique que la présence d'agrégats sous forme de lamelles influe positivement sur la résistance du béton à la flexion et par fendage. Pour la teneur en gros granulats sous forme de lamelles égale à 30% la maniabilité ne change pas tandis que sa résistance à la compression augmente de 20 %, celle à la flexion et par fendage augmente de 5%.

2.5.8 La résistance de la roche maternelle des agrégats et leur cohésion avec la pierre de ciment :

Dans tous les ouvrages on affirme que l'adhérence entre les granulats et la pierre de ciment influe sur la résistance du béton, cependant il est pratiquement difficile de mettre séparément en évidence l'influence de chaque facteur car tous les composants travaillent ensemble dans le mélange de béton ; voilà pourquoi on devrait considérer leur influence mutuelle sur la résistance du béton.

Mr Gordon S.S a fait les essais des bétons étuvés à base de pierres concassées de natures différentes. Il a confectionné des bétons tels que :

- le rapport E/C varie de 0.3 à 0.65

- la dimension maximale des granulats : $D_{max} = 20 \text{ mm}$
- le rayon moyen des mailles de ferrailage : $R = 0.3$
- l'indice de vibration : $I.V = 60 \text{ à } 100 \text{ secondes}$
- la dépense en eau : $162 \text{ à } 172 \text{ l/m}^3$

Les résultats des expériences :

On a donc établi une grande limite des écartements possibles de la résistance du béton en dépendance des propriétés des gros granulats. Ces essais utilisent comme facteur de base une grande variabilité de la résistance des roches dont l'influence est plus grande par rapport à celle des autres facteurs seulement pour des rapports E/C faibles. Par contre pour des rapports E/C élevés, la résistance de la roche ou des pierres concassées n'influe que faiblement sur la résistance du béton.

On mentionne que l'interaction chimique des granulats avec la pierre de ciment, se manifeste surtout et en un degré important pour les bétons à base de granulats artificiels poreux dont la résistance n'est pas grande.

L'influence des réactions chimiques des roches dures avec la pierre de ciment sur la résistance du béton est sensiblement inférieure à celle de la résistance et de l'hétérogénéité de la roche même.

2.6 Influence du rapport E/C sur la résistance en compression

S. FERKOUS, H. HOUARI, S. E. BENSEBTI, Z. GUEMMADI. [3], on montre que Les résistances en compression des bétons à 7 et 28 jours, mesurées sur cylindres (16 x 32 cm), sont présentées sur les figures 2.11 et 2.12. Les bétons BO5, BO6 et BO7 présentent des comportements similaires. Des optimums sont notés pour chacun des bétons ($E/C = 0.55$ pour BO5 et BO6 ; 0.65 pour BO7 ; 0.40 pour BO8). Par ailleurs, on remarque que tous les bétons étudiés présentent presque la même résistance (inférieure à 20 MPa) pour des valeurs voisines du rapport $E/C = 0.70$. Les meilleures résistances sont données pour les rapports $E/C = 0.50$ et 0.55 (supérieures à 20 MPa), tandis que la meilleure performance est donnée par le béton BO8 ($R_c = 32 \text{ MPa}$ pour $E/C = 0.4$).

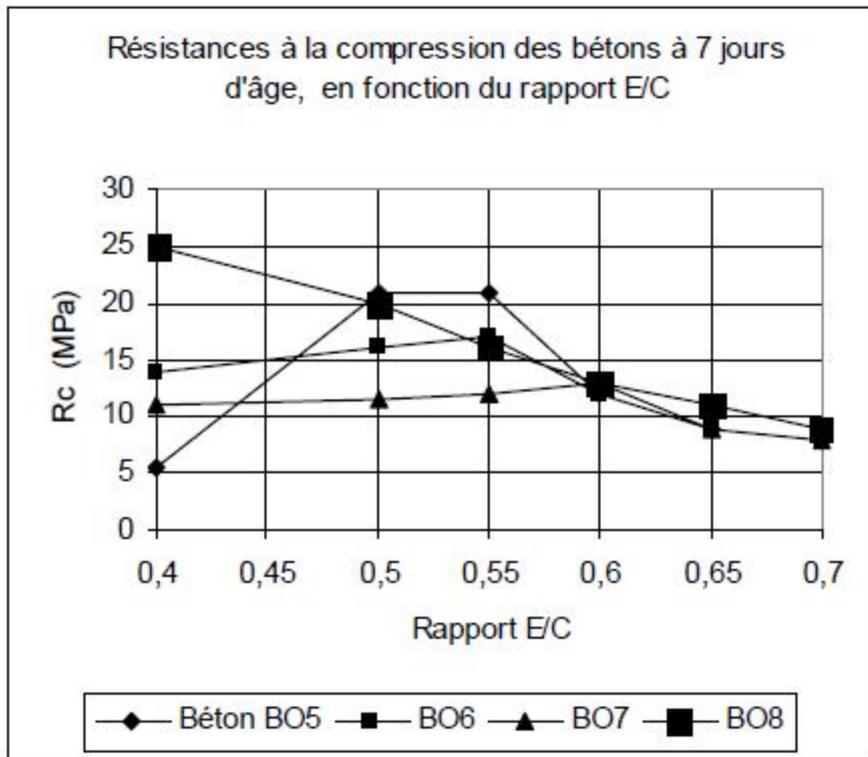


Figure 2.11 : Influence du rapport E/C sur les résistances en compression des bétons à 7 jours d'âge [3]

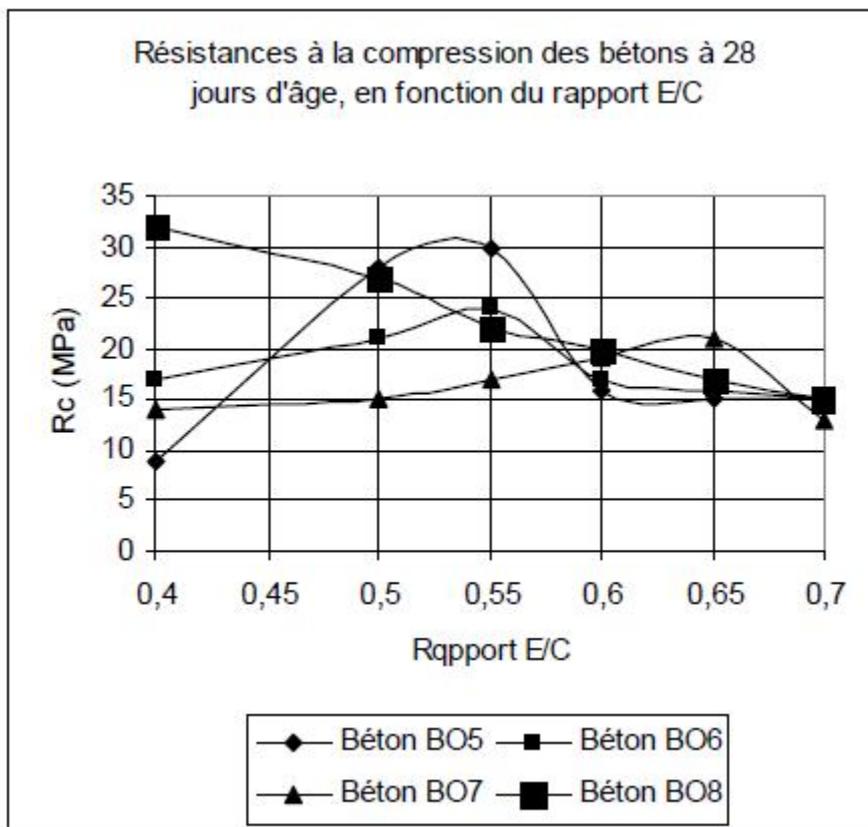


Figure 2.12 : Influence du rapport E/C sur les résistances en compression des bétons à 28 jours d'âge [3]

On observe que pour le béton BO7, quel que soit le rapport E/C, on a des résistances très faibles (inférieures à 20 MPa). Ceci est en accord avec les résultats relatifs aux densités et aux pourcentages d'air occlus obtenus. Ces résultats s'expliqueraient par la mauvaise liaison entre les granulats roulés manquant de rugosité et la pâte de ciment.

La liaison étant engendrée en partie par l'imbrication des granulats et de la pâte de ciment hydratée **Neville A.M [8]**.

Néanmoins, faut-il encore observer que pour le béton BO5, la courbe en cloche avec maximum entre les valeurs E/C = 0.50 et 0.55, renseigne que le béton confectionné avec E/C = 0.40 est un béton insuffisamment serré car il déroge à la règle générale bien établie que la résistance à la compression est une fonction décroissante du rapport E/C, selon Duff Abrams et René Féret cités dans **Neville A.M [8]**.

2.7 Influence de la teneur en fines sur le pourcentage d'air occlus dans les bétons

On constate qu'en général, le pourcentage d'air occlus diminue de 0.5 à 1 % avec l'utilisation des fillers jusqu'à 15 %. Mais reprend au-delà de cette valeur. L'optimum est atteint pour la valeur 15 %. Ce qui est en accord avec les résultats obtenues des densités des bétons. Par ailleurs, on notera que les bétons confectionnés avec du sable brut ont un pourcentage d'air occlus plus faible [3].

2.8 Influence de la teneur en fines sur la résistance à la compression des bétons

On constate que les résistances à la compression augmentent avec le pourcentage des teneurs en fillers et passent par un extremum pour 15 % de fillers environ, et ce, quel que soit le béton et le temps du durcissement. Au delà de la teneur en fillers de 15 %, les résultats s'inversent et diminuent plutôt rapidement. Des résultats en accord avec ceux trouvés précédemment et relatifs à la compacité.

Néanmoins, on constate que l'augmentation des résistances reste inférieure à 18 % dans tous les cas étudiés Figure 2.13 [3].

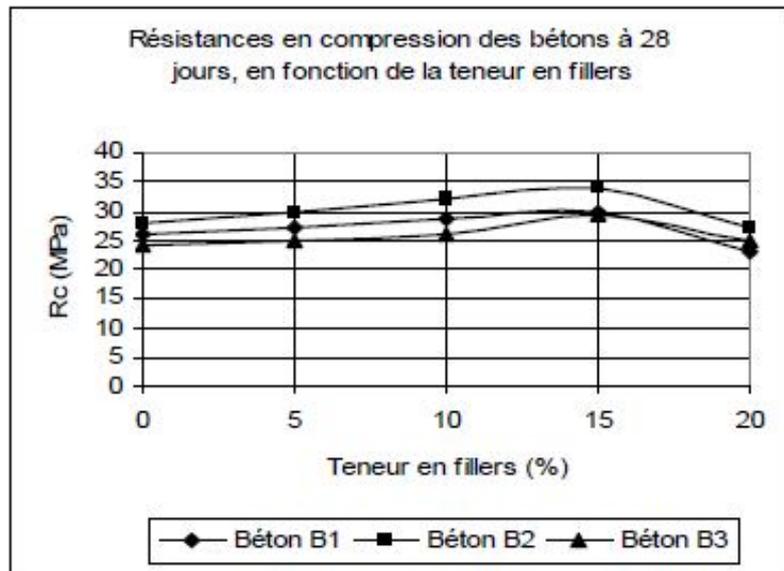


Figure 2.13 : Résistances en compression des bétons à 28 jours, en fonction de la teneur en fillers [3]

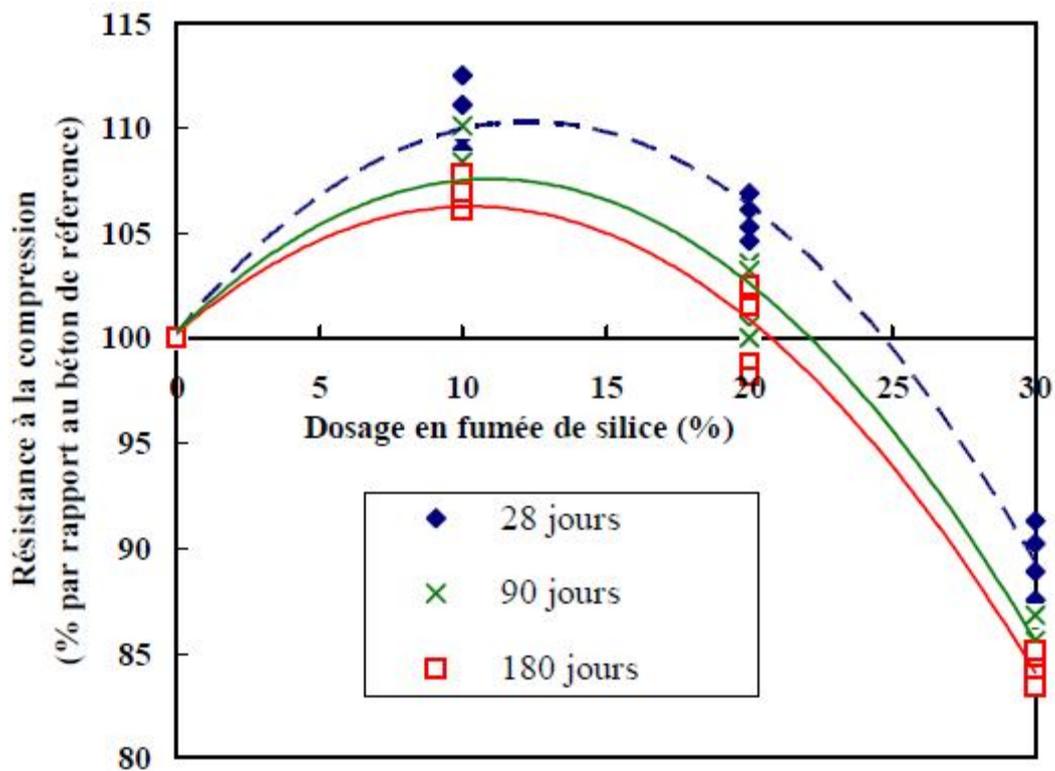


Figure2. 14. Influence de la teneur en fumée de silice sur la résistance en compression pour les différents E/(C+FS) [21].

El hadj. KADRI [21], l'effet de la teneur en fumée de silice sur la résistance des bétons confectionnés à maniabilité constante peut être apprécié au moyen des courbes de la figure 6. L'examen de ces courbes aux échéances de 28, 90 et 180 jours, montre que l'optimum de remplacement du ciment par la fumée de silice correspond à des teneurs de l'ordre de 10 à 15 %, en accord avec les résultats de [30]. Toutefois, le pourcentage d'augmentation de la résistance du béton avec 10% de fumée de silice reste modéré, et ne dépasse guère 10%. A plus long terme, ce gain de résistance décroît régulièrement, comme le montre la figure 6 pour les échéances de 90 et 180 jours. Enfin, au-delà d'une teneur de 20 à 25% de fumée de silice, l'effet de dilution de la fumée devient prépondérant et conduit à des résistances plus faibles qu'avec le béton de référence.

Dans l'ouvrage [22] L évolution de la résistance en compression en fonction du temps, présente la même allure quelque soit la teneur en fillers .Globalement, a 28 jours la résistance en compression des bétons de 18% de fillers est supérieur a celle du béton sans fillers. Par contre pour une teneur de 24% la résistance obtenue est faible. Entre 7 et 28 jours l'accroissement de la résistance en fonction du temps est de façon sensiblement linéaire. Au-delà de 28 jours l'effet de fillers tend à se stabiliser progressivement jusqu a 90 jours. Ce qui nous pousse à dire, qu'à plus long terme, la contribution à la résistance devient minime.

2.9 Conclusion

- La partie essentielle 80% a 90% du mélange du béton est composée de granulats, voilà pourquoi la nature et la qualité des granulats déterminent le choix du mode de calcul du béton et ses composants ainsi que le pronostic des propriétés de béton frais et durci.

- Les principales caractéristiques du granulat influant sur les propriétés des bétons sont les suivantes :
 - leur structure
 - leur déformabilité, et la résistance de la roche d'origine
 - forme des grains, leur granulométrie et leur grosseur maximale
 - la texture des grains
 - la nature minéralogique
 - présence des impuretés organiques poussiéreuses.

- Il est a signaler que lors des essais il n'était pas possible d'étudier séparément l'action d'un ou de plusieurs facteur en le prenant en qualité d'une variable indépendante ce qui complique la tâche et donne des résultats approximatifs.

- De nos jours, la technologie du béton prend en considération de nombreux critères des granulats, qui malheureusement, ne permettent pas d'apprécier la dépendance exacte des propriétés du béton, ce qui rend la base d'estimation quantitative de la qualité des granulats absolument insuffisante, ce qui influe sur la qualité des bétons frais et durcis.

- Les critères énumérés précédemment donnent la possibilité de créer des bétons possédant des propriétés bien déterminées et constantes, ce qui peut éclaircir l'influence des granulats sur les propriétés des bétons frais et durcis.

3 - Granulats, origines et caractéristiques : [23]

3-1 Introduction

On appelle granulats un ensemble de grains d'origine minérale, de dimensions comprises entre 0 et 80 mm, provenant de roches meubles, massives, de minerais ou de leurs transformations thermiques et de sous-produits de l'industrie.

Le tableau **3.1** donne une idée plus précise de cette définition.

Le domaine d'application des granulats peut aider à leur définition :

— utilisés liés avec du ciment ou du bitume, ils représentent 80 à 90 % des mortiers et bétons hydrauliques destinés au bâtiment et ouvrages d'art, mais aussi des enrobés et graves traitées destinés aux assises de chaussées et des voies ferroviaires ;

— utilisés non liés, ils représentent 100 % des drains, des filtres et de certaines assises.

Pour certains auteurs il faut y ajouter les matériaux extraits de roches massives ou meubles et mis en œuvre tels quels (tout-venant) pour faire des remblais, par exemple. En fait, ces matériaux représentent le domaine distinct des terrassements avec ses aspects particuliers : extractions, traitements en général en place, compactage, stabilité, méthodes d'études particulières, etc.

Ce qui va distinguer le granulats du tout-venant, c'est l'aspect préparation après extraction qui en fait un produit industriel répondant à des critères dimensionnels, physico-mécaniques et chimiques très stricts :

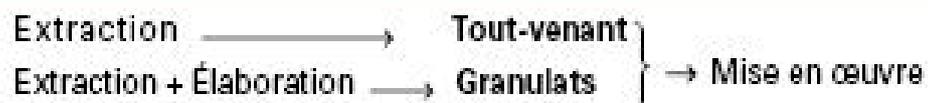


Tableau 3.1 Granulats. Origines et caractéristiques

Tableau A – Origine des principaux granulats utilisés				
Roches d'origine	Transformations			Usages
	aucune	concassage criblage	thermiques	
Argiles			Argiles expansées	Mortiers Bétons hydrauliques Graves traitées ou non Enrobés Enduits. Clous Ballasts Filtres Drains
Limons	Tout-venant	Fines Sables Gravillons Cailloux Ballasts	Verres expansés	
Sables				
Graviers				
Pouzzolanes				
Roches massives			Schistes expansés	
Minerais		Barytine	Laitiers	
Autres origines : démolition de bâtiments et de chaussées		Fines, sables, gravillons, etc.		

(1) Ces granulats représentent plus de 90 % de la production.

Tableau B – Définition des différents types de granulats		
Fines	0/D	avec $D \leq 0,080$ mm
Sables	0/D	avec $D \leq 6,3$ mm
Gravillons	d/D	avec $d \geq 1$ mm et $D \leq 31,5$ mm
Cailloux	d/D	avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm
Graves	0/D	avec $6,3 < D \leq 80$ mm
Ballasts	d/D concassé	avec $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm

Les granulats sont classés suivant leur granularité, qui est la distribution dimensionnelle de leurs grains, ce qui conduit aux appellations normalisées du tableau B où D et d représentent respectivement la plus grande et la plus petite dimension du granulat avec des conditions de refus à D et de tamisat à d comprises entre 1 et 15 %.

Les granulats sont dits naturels lorsqu'ils sont extraits de leur site géologique d'origine et artificiels dans les autres cas ; ils sont dits légers lorsque leur masse volumique réelle ρ_r est inférieure à 2 g/cm^3 , courants si ρ_r est comprise entre 2 et 3 g/cm^3 et lourds au-delà de 3 g/cm^3 .

Il s'agit là d'un chiffre moyen et assez stable couvrant les quinze dernières années. Cela représente 6 t/an par habitant, ce qui est caractéristique des pays industrialisés dans le monde.

Granulats, origines et caractéristiques

Après l'extraction des sables et graviers alluvionnaires (sablères, gravières, ballastières) et l'abattage à l'explosif des roches massives comme les granites, les calcaires, etc. (carrières), le tout-venant est criblé, ou criblé et concassé pour constituer les granulats.

Les granulats les plus couramment utilisés dans le bâtiment et le génie civil ont une masse volumique réelle comprise entre 2 et 3 Mg/m³.

Les normes européennes ont remplacé les normes françaises en juin 2004, concrétisant ainsi quinze ans de normalisation des granulats en Europe. Plusieurs nouveautés ont sensiblement modifié les habitudes mais se sont avérées sans incidence notable sur les bétons hydrauliques et les produits routiers : le remplacement des tamis à toile tissée par des tamis à tôle perforée à trous carrés pour les dimensions supérieures ou égales à 4 mm, la détermination des fines au tamis de 0,063 mm au lieu du tamis de 0,080 mm, etc.

3.2. Principales ressources

3.2.1 Origine des roches

L'homme exerce ses activités sur la partie solide la plus superficielle de l'écorce terrestre. Mis à part les rares surfaces où la roche saine affleure, il rencontre toujours dans la nature la même succession verticale : terre arable en surface, sur une profondeur de 0 à 1 m, zone altérée meuble en dessous, de 0 à 30 m, et roches saines en profondeur qui peuvent être meubles (argiles, sables, etc.) ou massives (calcaires, granites, etc.) (Figure 3.1).

Cette distinction entre roches meubles et massives est importante sur le plan technologique, mais elle ne coïncide pas avec leur genèse.

À l'origine du globe terrestre, qui se chiffre en milliards d'années, il s'est formé, par refroidissement en surface du magma en fusion, des silicoaluminates de potassium, sodium, calcium, magnésium et fer (pour ne citer que les principaux). Coordonnés par l'oxygène, qui représente en volume 98 % de cette matière, ces éléments s'associent pour constituer les minéraux.

Selon la composition chimique des magmas d'origine, il s'est formé des associations minéralogiques différentes, que l'on appelle roches magmatiques, et qui peuvent être schématisées par les deux extrêmes que sont les granites riches en silice, K et Na, et les gabbros, plus pauvres en silice et plus riches en Ca, Fe et Mg.

En général, ces roches sont massives, sauf le cas de certaines projections volcaniques (cendres, pouzzolanes, etc.) qui sont parfois meubles.

L'apparition de l'eau et d'événements climatiques semblables à ceux qui existent actuellement a entraîné une évolution de surface de ces roches (ou altération) : dissolution,

Granulats, origines et caractéristiques

désagrégation, transport et dépôt (ou sédimentation) dans les lits des rivières, les lacs, les mers de sables, graviers, argiles, vases et boues riches en calcium.

D'autres minéraux se forment dans ces nouvelles conditions : argiles, carbonates comme la calcite ou la dolomite, etc.

Le développement de la vie végétale (1 milliard d'années ?) introduit la sédimentation d'un élément nouveau, le carbone, qui est à l'origine des charbons et pétroles.

Ces roches sédimentaires meubles peuvent se consolider par précipitation chimique de la silice et du calcium, et parfois du magnésium dissous, et donner les grès, calcaires, dolomies, etc.

La transformation de ces roches magmatiques et sédimentaires sous l'action de contraintes σ et de températures θ élevées conduit aux roches métamorphiques. Elles sont caractérisées par un feuilletage ou une schistosité dus aux contraintes orientées (schistes, ardoises, etc.) et par une recristallisation due à ces deux facteurs (σ , θ) (micaschistes, gneiss). Il peut y avoir schistosité sans recristallisation, comme pour les ardoises, ou recristallisation sans feuilletage (cornéennes).

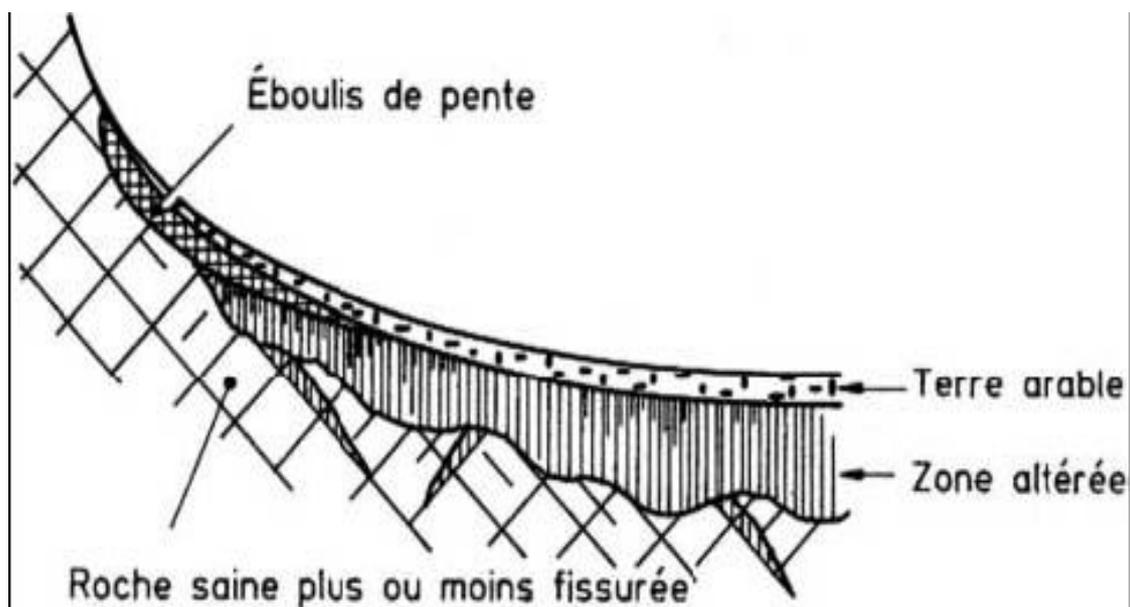


Figure 3.1 – Coupe classique des cinquante premiers mètres de l'écorce terrestre

La notion d'intermédiaire est omniprésente en géologie :

— entre les compositions chimiques extrêmes des magmas, tous les termes de passage existent, conduisant à des compositions minéralogiques variées :

granites → granodiorites → diorites → gabbrodiorites → gabbros

Granulats, origines et caractéristiques

— entre les modes de dépôts, d'alimentation et de cimentation des roches sédimentaires, tous les intermédiaires existent :

calcaires→calcaires dolomitiques→dolomies

calcaires→calcaires gréseux→grès →quartzites

calcaires→calcaires argileux→marnes →argiles

— ainsi qu'entre les modes de transformation des roches métamorphiques :

sables argileux→schistes→schistes tachetés →cornéennes

Toutes ces roches sont soumises aux altérations météoriques et alimentent la formation des sédiments, elles peuvent être soumises à l'action du métamorphisme. Cela montre toute la complexité de l'origine des roches qui peut être schématisée dans la (figure 3.2).

Si l'on ajoute à cela les perturbations mécaniques dues aux déformations de l'écorce terrestre (plissements, fissurations ou diaclases, failles), on comprendra qu'il est en général difficile de définir la géométrie d'un gisement sans le secours de la géologie.

Les granulats peuvent être naturels, artificiels ou recyclés.

Les granulats naturels sont des grains minéraux qui proviennent de roches massives ou meubles n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique.

Les granulats artificiels sont des grains minéraux qui résultent d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

Les granulats recyclés sont obtenus par traitement d'une matière inorganique précédemment utilisée dans la construction.

3.2.2 Granulats naturels

Les roches exploitées pour la production de granulats naturels sont des roches massives d'origine éruptive ou sédimentaire, constituées de minéraux fortement liés entre eux, et des roches meubles d'origine sédimentaire, formées d'éléments détritiques non consolidés.

3.2.3 Minéraux

Ce sont les constituants des roches ; ils conditionnent donc, dans une large mesure, leurs propriétés.

Le quartz (SiO₂) est le minéral le plus fréquent, en particulier dans les sables marins et alluvionnaires, dans les grès, les quartzites et les schistes.

Il est inaltérable, dur et résistant.

Il pose des problèmes d'adhésivité avec les liants hydrocarbonés que l'on sait résoudre par dopage des surfaces. Il peut conduire à des inconvénients à terme (5 à 30 ans suivant le climat) lorsqu'il présente une grande surface spécifique ou que son réseau cristallin a été

déformé : dans les milieux basiques des bétons hydrauliques, il participera au développement de gels gonflants (phénomènes de réactions alcalis-silice).

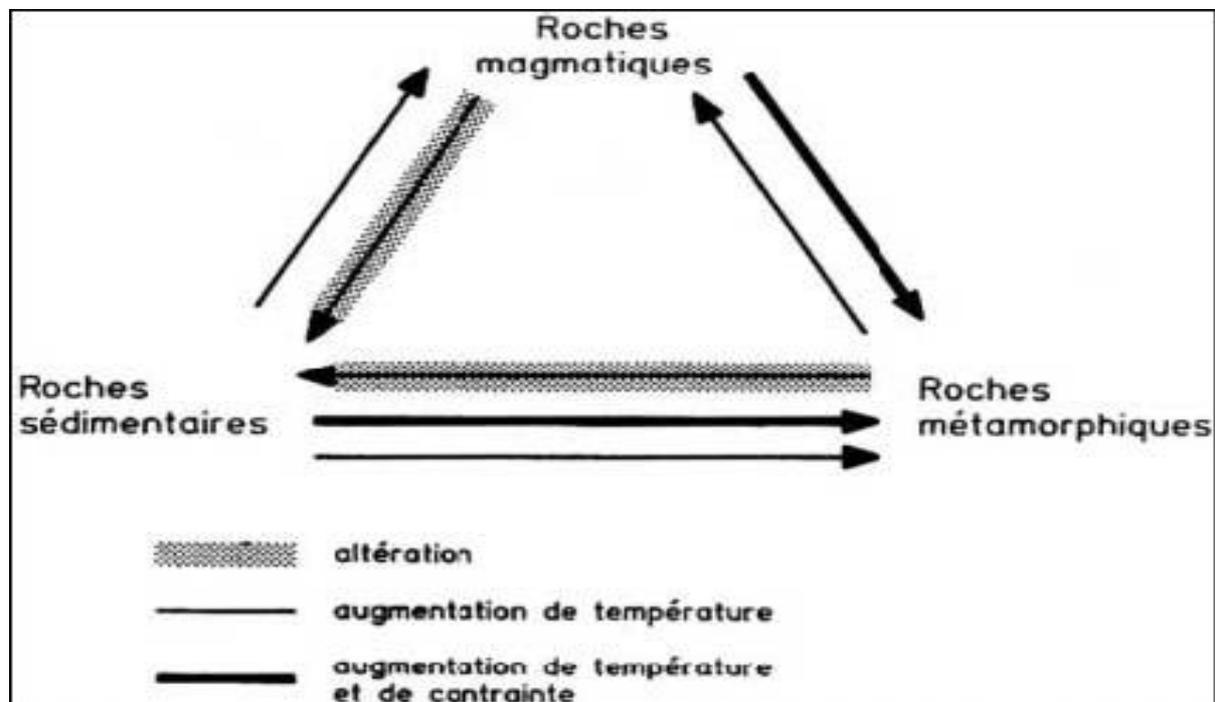


Figure 3.2 – Transformations des roches

C'est un minéral dur, donc favorable pour maintenir la rugosité de surface des chaussées, favorable comme agent abrasif, mais qui, en contrepartie, usera rapidement les engins de terrassement, d'extraction, de foration, de criblage et de concassage.

Les feldspaths (silicates d'alumine avec K, Na et Ca) sont surtout abondants dans les roches magmatiques et métamorphiques.

Lorsqu'ils ne sont pas altérés, ou qu'ils ont subi une altération hydrothermale, ils ne posent pas de problèmes particuliers. Par contre, l'altération météorique a pu détruire en partie leur réseau cristallin, avec un développement d'argiles plus ou moins nocives susceptibles de polluer les sables de concassage ou la surface des gravillons et de nuire à l'adhésivité des liants.

Les micas (silicates d'alumine avec Mg et K), présents dans la plupart des roches magmatiques et métamorphiques, ont une forme lamellaire et sont très tendres. Ils sont gênants par leur forme et leur faible cohésion interfoliaire peu favorable à l'adhésion des liants.

Granulats, origines et caractéristiques

Mais ce n'est qu'au-delà de 10 % qu'ils sont néfastes, et s'ils sont de grande taille (millimétrique).

Les argiles, très proches des micas, s'en distinguent par leur petite taille (micrométrique) et leur aptitude à fixer de l'eau.

On les trouve dans toutes les roches sédimentaires et leur présence est surtout gênante dans les sables, où elles entraînent des diminutions de résistance en présence de liants hydrauliques et une sensibilité à l'eau, à long terme, avec les liants hydrocarbonés.

À la surface des plus gros éléments, elles font écran vis-à-vis de tous les liants. Dans le cas d'utilisation sans liants, elles favorisent les déformations.

Les autres silicates, surtout présents dans les roches magmatiques et métamorphiques, sont très stables (silicates de métamorphisme) ou ont un rôle peu connu (pyroxènes, amphiboles, péridots).

Il est évident que leur état d'altération météorique, comme pour les feldspaths, est le point le plus important.

Les carbonates, parmi lesquels la calcite (CaCO_3) est la plus commune, sont assez tendres et très stables et s'associent très bien aux liants (liaison épitaxiale avec le ciment, par exemple). La calcite constitue l'essentiel des calcaires, avec une substitution fréquente de Ca par Mg (calcaires magnésiens, calcaires dolomitiques, dolomies) qui conduit à un minéral plus dur et un peu plus abrasif : la dolomite.

Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), très tendre et assez soluble dans l'eau, est présent dans certaines roches sédimentaires de pays secs. Les réactions qu'il provoque avec les ciments (formation d'ettringite gonflante) sont à éviter. L'anhydrite (CaSO_4) pose les mêmes problèmes.

La pyrite (FeS_2), parfois présente dans certaines roches métamorphiques et alluvionnaires, est un minéral instable : oxydation facile laissant des traînées de rouille sur les façades en bétons, formation d'ettringite gonflante avec les ciments, attaque acide des parties métalliques des ouvrages.

Sur le plan mécanique, les minéraux peuvent être classés en trois groupes :

- durs et résistants : quartz et silicates de métamorphisme ;
- résistants et moyennement durs : feldspaths et silicates ferromagnésiens ;
- tendres et moyennement résistants : carbonates et micas.

On verra dans le tableau 3-2 les répercussions que cela entraîne sur les propriétés des roches.

3.2.4 Roches massives

Ce sont des assemblages de minéraux ; elles ont donc, en général, des propriétés en partie liées à celles des minéraux. Mais l'assemblage est rarement parfait du fait de la présence de vides.

Ces vides sont parfois grossièrement sphériques (pores) et dus au dégazage des roches magmatiques (basaltes vacuolaires, pouzzolanes) ou à une cimentation incomplète des roches sédimentaires (grès, calcaires poreux). Ils se présentent parfois sous forme de fissures très fines dues à des contraintes d'origine thermique ou mécanique et peuvent, dans ce cas, affecter toutes les roches. Pores et fissures conduisent à des diminutions de résistance, de même lorsque les cristaux deviennent plus gros (millimétriques ou plus).

Une autre particularité est aussi défavorable vis-à-vis de la résistance et surtout de la production d'éléments plats au concassage :

C'est l'anisotropie de la roche due à une orientation privilégiée de certains minéraux (micas par exemple) ou à une disposition en lits alternés de minéraux différents.

Enfin, l'état d'altération des silicates autres que le quartz entraîne, en général, une diminution de la qualité. Ces tendances sont indiquées dans le tableau 1.

Les figures 3.3 et 3.4 et le tableau 3.2 classent les roches massives les plus exploitées en France en fonction de leur composition minéralogique et de leur structure.

Tableau 3.2 influence des caractéristiques des roches sur leurs propriétés [23]

Tableau 1 – Influence des caractéristiques des roches sur leurs propriétés						
Caractéristiques	Propriétés					
	Résistance				Abrasivité	Forme (1)
	à la compression	à l'usure	au polissage	au gel		
Gros grain	moyenne	moyenne	forte		forte	bonne
Grain fin	forte	forte	faible		moyenne	mauvaise
Porosité	faible	faible	forte	faible	forte	bonne
Fissuration	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	
Anisotropie	moyenne	moyenne	forte	moyenne	moyenne	mauvaise
Minéraux durs ou durs et tendres	forte	forte	forte		forte	moyenne
Minéraux tendres	moyenne	faible	faible		faible	bonne
Altération	faible	moyenne	forte	moyenne	forte	bonne

(1) On dit que les grains ont une bonne forme lorsqu'ils tendent vers la forme sphérique.

Tableau 2 – Roches métamorphiques				
Roches dues à l'influence de la température	schiste	schiste tacheté	cornéenne	grain fin
Composition minéralogique	quartz + micas	quartz + micas	quartz + feldspaths	
	quartz + feldspaths + micas	quartz + feldspaths	quartz + amphibole	
Roches dues à l'influence de la température et de la pression	gneiss	leptynite	amphibolite	gros grain

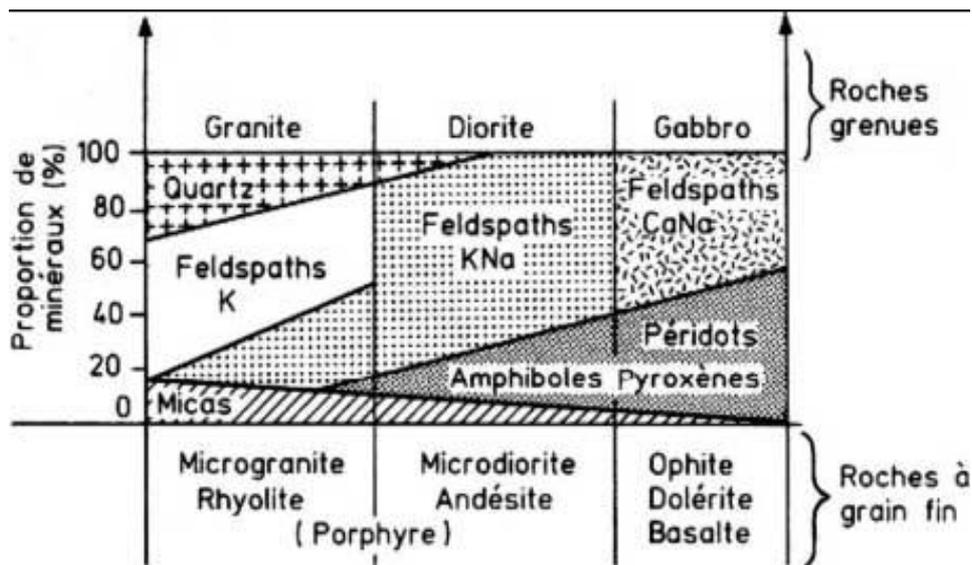
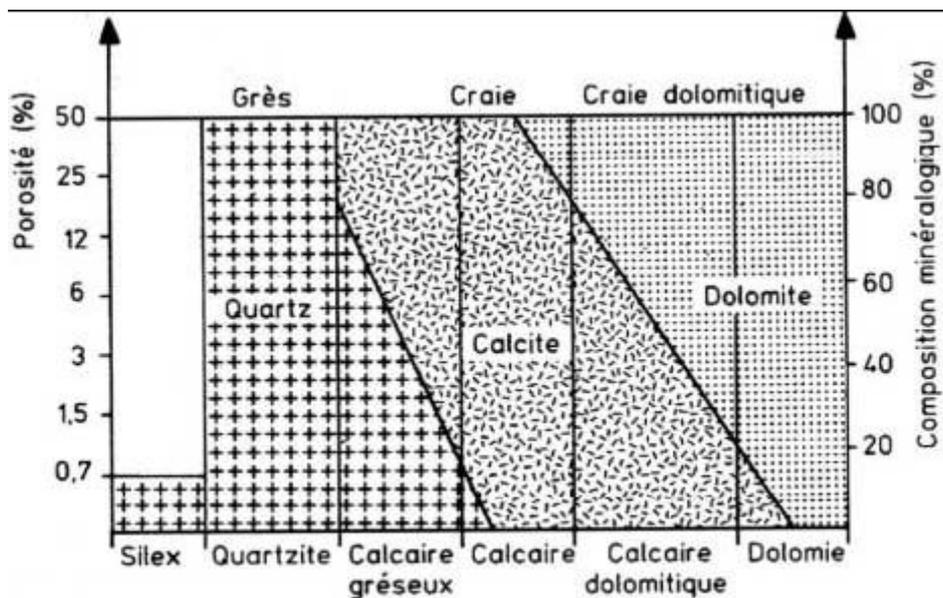


Figure 3.3 – Roches magmatiques



Exemple : une roche contenant 50 % de calcite et 50 % de dolomite est un calcaire dolomitique. Si sa porosité est très élevée, on a affaire à une craie dolomitique (ou à un calcaire dolomitique grossier).

Figure 3.4- Roches sédimentaires

Granulats, origines et caractéristiques

Les gisements de roches magmatiques se présentent sous la forme de masses importantes enracinées en profondeur (roches plutoniques), leur extension en surface est en général plus limitée qu'en profondeur. Les coulées de laves ont une extension en surface variable, avec un enracinement assez réduit (roches volcaniques).

Ces roches sont toujours parcourues de fissures (diaclasses), parfois de failles, qui sont des cheminements privilégiés pour l'altération météorique, source de pollution argileuse.

Les roches sédimentaires massives se présentent toujours en bancs de quelques mètres à quelques dizaines de mètres d'épaisseur, horizontaux lors de leur dépôt, mais qui ont pu être perturbés lors des déformations de l'écorce terrestre jusqu'à se trouver verticaux. Ces déformations et des phénomènes de retrait lors de leur passage de l'état meuble à l'état massif font qu'elles sont parcourues de cassures (diaclasses) souvent remplies d'argiles.

Les roches métamorphiques se présentent en bancs d'épaisseur et d'orientation variables qui peuvent, pour les termes de passage aux roches magmatiques, s'enraciner en profondeur. Elles sont aussi parcourues de diaclasses.

- Granulats de roches massives éruptives

Deux familles de roches massives éruptives sont classiquement distinguées : les roches magmatiques et les roches métamorphiques.

■ Les roches magmatiques sont issues des profondeurs de l'écorce terrestre. Elles résultent du refroidissement d'un magma. Deux types de roches sont ainsi différenciés : les roches plutoniques et les roches volcaniques.

Les roches plutoniques proviennent d'un refroidissement lent du magma, piégé par l'écorce terrestre. Elles ont affleuré à la surface de l'écorce terrestre par suite de mouvements tectoniques ou de l'érosion des formations sus-jacentes. Elles se caractérisent par leur structure grenue, où les minéraux sont largement développés et bien visibles à l'œil nu (granites, diorites, gabbros, etc.).

Les roches volcaniques proviennent d'un refroidissement rapide du magma, qui s'est épanché et solidifié à la surface de l'écorce terrestre sous forme par exemple de coulées de lave. Elles se caractérisent par leur structure fluidale, microlitique voire vitreuse, où la plupart des minéraux n'ont pas eu le temps de se développer et sont de ce fait invisibles à l'œil nu (rhyolites, andésites, basaltes, etc.).

■ Les roches métamorphiques résultent, quant à elles, de la transformation des roches superficielles sous l'effet d'une élévation de la température et/ou de la pression, au fur et à mesure de leur enfouissement en profondeur par l'action de phénomènes multiples et complexes. Elles ont été remontées à la surface de l'écorce terrestre par des mouvements de

Granulats, origines et caractéristiques

soulèvement de grande ampleur. Elles se caractérisent par une orientation plus ou moins marquée de certains minéraux, voire par une structure feuilletée (gneiss, leptynites, amphibolites, quartzites, cornéennes, etc.).

Les granulats ayant pour origine les roches éruptives conviennent généralement bien à la confection des bétons hydrauliques et à l'exécution des travaux de viabilité courants. Beaucoup sont les constituants de choix des techniques routières et plus particulièrement de celles destinées aux couches de roulement. Certains peuvent être utilisés pour la réalisation du ballast des voies ferrées.

-Granulats de roches massives sédimentaires

Les roches massives sédimentaires se sont formées à la surface des continents et au fond des océans. Elles englobent notamment les roches siliceuses et les roches carbonatées.

Les roches siliceuses, d'origine principalement détritique, proviennent de la cimentation des grains d'un sable (grès à grès quartzeux voire quartzitiques, selon le degré de remplissage des vides laissés entre les grains par la silice qui les lie, etc.). Leur résistance dépend essentiellement de leur porosité.

Les roches carbonatées ont une origine organo-chimique : origine organique par l'accumulation de débris de coquilles ou l'activité coloniale de coraux, origine chimique par la précipitation des carbonates qui constituent généralement le ciment. Les structures peuvent être très variées, suivant la dimension, la forme et la proportion des coquilles, l'importance du ciment, le pourcentage des autres minéraux et des pores (calcaires, calcaires dolomitiques, etc.).

Leur résistance est conditionnée en grande partie par leur porosité.

Les roches massives calcaires affleurent dans les bassins sédimentaires (bassin Parisien, bassin Aquitain) et les chaînes plissées récentes (chaîne alpine, chaîne pyrénéenne).

Les granulats calcaires satisfont aux exigences techniques de la demande courante : bétons hydrauliques et viabilité. La plupart donnent de bons matériaux routiers mais leur emploi pour la réalisation des revêtements de chaussées reste limité parce qu'ils sont sensibles au polissage et cela d'autant plus que leur pâte est plus fine et que leur pureté est plus grande.

3.2.5 Roches meubles

Elles sont constituées de fragments de roches massives décrites ci-avant, sauf pour les plus petits éléments (< 1 mm) qui sont souvent monocristallins (quartz, feldspaths).

Les seules roches meubles d'origine magmatique exploitées en France sont les pouzzolanes, roches volcanosédimentaires accumulées lors des éruptions volcaniques (chaîne des Puys, par

Granulats, origines et caractéristiques

exemple), et plus rares, les ponces, terme extrême du dégazage volcanique, blanches et de masse volumique $\rho < 1 \text{ g/cm}^3$.

Les pouzzolanes sont constituées d'éléments scoriacés compris entre 0 et 10 mm formés de verre englobant de rares cristaux de feldspaths, de silicates ferromagnésiens et de 20 à 50 % de bulles d'air bien visibles à l'oeil nu. Toutes les autres roches meubles exploitées sont d'origine sédimentaire ; on peut distinguer :

- les dépôts alluviaux, les plus importants en tonnages extraits (95 %), exploités dans les lits vifs des rivières (sables et graviers, en général propres), dans les basses vallées (sables et graviers légèrement pollués par des argiles, c'est la source la plus importante) et dans les terrasses alluviales, en général plus polluées et contenant souvent des éléments altérés ;
- les dépôts alluviaux immergés exploités en mer (sables et graviers) ;
- les dépôts laissés par les glaciers ou moraines (argiles, sables, cailloux et blocs) ;
- les dépôts formés par l'action du gel et de la gravité : éboulis de pentes (argiles, sables, cailloux et blocs) ;
- les dépôts sableux repris par le vent : dunes (sables, sables fins) ;
- les formations sableuses déposées en mer : sables, sables fins.

Le quartz est très largement dominant dans ces formations, les feldspaths sont présents dans les zones amont des rivières, ainsi que la calcite dans les régions où existent en abondance des niveaux calcaires.

Mis à part les formations marines qui se présentent en couches régulières et souvent homogènes, tous les autres dépôts sont hétérogènes en granularité et en épaisseur, et contiennent souvent des lentilles argileuses de dimensions très variables. L'hétérogénéité granulaire de ces formations nécessite de connaître ces variations qui ont une influence sur les modalités de l'extraction.

Tableau 3.3 objectifs et possibilités des méthodes de prospection.

Tableau 3 – Objectifs et possibilités des méthodes de prospection			
	Méthodes	Roches massives	Roches meubles
Phase 2	Prospection électrique	Épaisseur de la découverte (zones faillées)	Épaisseur de la découverte
	Trainée de résistivité	Méthode plus précise	Méthode plus précise
	Magnétotellurique artificielle Sismique réfraction	Épaisseur de la découverte	Épaisseur de la découverte si le substratum est massif
	Ces méthodes rapides servent à implanter judicieusement les sondages.		
Phase 3	Sondages carottés Sondages destructifs (vitesse de foration)	Épaisseur ponctuelle de la découverte Calage pour les sondages destructifs Qualité du matériau, essais sur éclats	
	Tarière Pelle hydraulique pour les alluvions		Épaisseur ponctuelle de la découverte et du gisement, qualité du matériau, granularité (1), cartes topographiques précises : surface du sol, toit matériau exploitable et isopaques de la découverte, toit substratum et isopaques du matériau exploitable
Phase 4	Diagraphies : radioactivité naturelle, résistivité	Précisions sur la structure des gisements	Pollution argileuse et structure des gisements
(1) La connaissance des variations de granularités dans l'espace est fondamentale pour les roches meubles car elle conditionne les modalités de l'extraction si l'on veut obtenir une granularité homogène.			

-Granulats de roches meubles

Les roches meubles sont des dépôts détritiques qui n'ont pas été cimentés. Elles résultent d'un ensemble de processus d'érosion et de sédimentation.

■ Elles sont surtout exploitées le long des fleuves et de leurs affluents : les villes se sont créées et agrandies au voisinage de l'eau, dans les vallées. Ainsi, les alluvions constituent généralement les matériaux de construction traditionnels les plus proches ; ce sont aussi les plus faciles à extraire. Par ailleurs, la diversité des sédiments (composition pétrographique, granularité, etc.), lorsqu'ils existent et subsistent, permet de répondre à la quasi-totalité de la demande.

La proximité des lieux de consommation, le large éventail des qualités offertes, les coûts de production modérés par suite du travail de préconcassage, précriblage et pré-lavage effectué durant les phases géologiques de dépôt, expliquent le développement important de l'exploitation des matériaux alluvionnaires et la place prépondérante qu'ils occupent dans le marché des granulats.

Le renforcement de la législation sur les carrières et sur la protection des ressources en eau, l'épuisement de certains gisements, la concurrence au niveau de l'occupation des sols, la spéculation foncière, la sensibilisation de plus en plus marquée de l'opinion publique aux

Granulats, origines et caractéristiques

problèmes liés à l'environnement, toutes ces contraintes concourent à limiter l'extension des zones d'extraction, voire à interdire l'ouverture de nouvelles exploitations.

■ Des matériaux alluvionnaires sont également extraits en mer, sur la plate-forme continentale à l'embouchure des fleuves. Il s'agit d'alluvions fluviatiles anciennes correspondant à des terrasses alluviales continentales qui ont été submergées. Les gisements exploitables renferment principalement des sables, de compositions pétrographiques et de granularités très variées (de sables quartzeux purs aux sables coquilliers purs, avec tous les intermédiaires possibles).

Les réserves en granulats marins sont considérables, mais leur exploitation intensive pose des problèmes écologiques, économiques et techniques.

■ Des sables fins non alluvionnaires sont aussi employés comme granulats. Ils proviennent de dépôts détritiques anciens, qui ont été brassés par des courants marins puis recouverts par d'autres formations sédimentaires à la suite de variations successives des conditions paléogéographiques, et qui se retrouvent actuellement émergés sur des étendues et des épaisseurs variables.

De plus, quelques autres matériaux détritiques sont ponctuellement exploités. Il s'agit principalement de dépôts soit résiduels, soit très peu transportés donc souvent mal classés (arènes granitiques, moraines fluvio-glaciaires, éboulis de pente, etc.).

Granulats artificiels ou recyclés

Divers types de granulats artificiels ou recyclés s'avèrent en outre potentiellement utilisables, plus particulièrement en technique routière, sous réserve de résultats d'études préalables probants. La politique actuellement menée en matière d'environnement tend à favoriser le développement de leur emploi, dans le respect des règles environnementales et techniques visant à minimiser les risques de pollutions et de désordres.

Les granulats artificiels peuvent être des coproduits de l'industrie sidérurgique (laitiers de haut fourneau refroidis à l'air, laitiers d'aciérie issus d'un four à arc électrique, etc.), des coproduits de l'industrie minière (schistes houillers, etc.), voire des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères.

Les granulats recyclés résultent de la déconstruction d'ouvrages du bâtiment et du génie civil (matériaux de démolition et agrégats d'enrobés essentiellement).

À côté des granulats naturels issus des roches, et qui représentent l'essentiel de la production, il existe d'autres granulats qui proviennent de la transformation thermique de roches, de coproduits, de déchets ou d'anciens ouvrages.

Granulats, origines et caractéristiques

D'origine artificielle, les matériaux expansés par action thermique d'argiles, schistes, laitiers, cendres volantes. Leur masse volumique $\rho < 1 \text{ g/cm}^3$ les rend intéressants pour les bétons légers, mais en contrepartie leur forte porosité entraîne souvent une absorption d'eau (10 à 15 %) dont il faut toujours tenir compte pour cet usage.

Le traitement thermique de minerais d'aluminium (bauxite) conduit à la fabrication de bauxite calcinée (1 600 °C) utilisée comme granulats antidérapant. Au-delà de 2 000 °C, il se forme du corindon (alumine Al_2O_3) donnant des granulats très durs et abrasifs.

Les laitiers sont essentiellement des coproduits de la fabrication de la fonte et des aciers. Ces produits, refroidis en fosse, donnent une roche plus ou moins vacuolaire formée de silicates d'alumine calciques voisins des feldspaths. Les sous-produits d'aciéries sont en général plus denses et plus résistants, mais présentent un risque de présence de chaux instable lorsque le produit élaboré est récent.

Les laitiers concassés ont les mêmes usages que les granulats naturels.

Le laitier granulé refroidi en présence d'eau doit être considéré plus comme un liant hydraulique que comme un granulats.

Le concassage d'anciennes chaussées en bétons, en enrobés, ou de friches industrielles bâtiments, essentiellement conduit à des granulats dont l'utilisation se développe progressivement. L'emploi de bétons concassés non pollués pour faire un autre béton ne pose pas de problème. Les friches industrielles sont beaucoup plus hétérogènes (mélange de bétons, terres cuites, céramiques, plâtres, etc.) et nécessitent des traitements particuliers et un contrôle plus poussé des granulats produits. Les enrobés ne sont retraités que pour être régénérés.

3.3 Exploitation des gisements

3.3.1 Extraction

L'objectif principal est d'amener dans l'usine de préparation la plus forte proportion possible de matériaux sains.

Pour les gisements meubles hors d'eau, il faut enlever la partie superficielle ou découverte, réserver les terres arables et éliminer les parties altérées. Cela s'effectue avec une décapeuse automotrice qui peut en assurer le transport sur 1 km environ, ou avec une pelle associée à des tombereaux.

Si le gisement est immergé, l'extraction se fera à l'aide d'une drague à godets, à grappins ou d'une drague suceuse. Ce dernier dispositif est le plus efficace pour les gisements en mer.

Les mêmes matériels servent pour extraire la partie saine du matériau.

Le choix de plusieurs points d'extractions simultanés est important pour obtenir la granularité désirée par mélange.

Le transport se fait en général par bandes transporteuses.

Pour les roches massives, la découverte est éliminée à l'aide d'une pelle hydraulique.

Ici, l'abattage à l'explosif est nécessaire pour fragmenter au maximum le matériau et éviter les trop gros blocs qui ne pourraient être admis directement dans le premier concasseur (ou débiteur).

Après formation, suivant un schéma adapté à la structure du gisement, mise en place de l'explosif et utilisation de microretards pour limiter les ébranlements (nuisance pour l'environnement), le matériau est réduit en un 0/2 000 mm par abattage de 10 000 à 50 000 t. Repris à la pelle à câble ou hydraulique, ou à l'aide d'une chargeuse à pneus, il est déversé sur le premier élément de la chaîne d'élaboration (grille de scalpage ou débiteur).

3.3.2 Élaboration des granulats

Après abattage ou extraction, le tout-venant va subir trois types de transformations : le criblage, le concassage et le lavage.

Le criblage est commun à toutes les installations quel que soit le type de roche exploitée. Cette fonction de classement est fondamentale puisqu'elle va devenir les produits marchands tels que : fines, sables, gravillons, ballasts et graves et leur dénomination précise comme : sable 0/2 ou gravillon 6,3/10.

Pour les roches massives, un aspect particulier du criblage est l'élimination de 0/D qui se pratique en amont (grille de scalpage à barres parallèles) ou après le débiteur (crible à mailles carrées), ou les deux dans le but d'éliminer le maximum de produits argileux.

Pour les roches meubles, il y a souvent un écrêtage des plus gros éléments inutilisables tels quels. Le criblage se fait, en général, sur des cribles vibrants à une ou plusieurs toiles à mailles carrées.

Deux pièges sont à éviter dans le criblage :

- le sous-dimensionnement des cribles (ou la suralimentation), l'utilisation d'alimentateurs spéciaux permet de limiter ce défaut ;
- l'alimentation par des matériaux pollués (ou à teneur en eau élevée pour les plus petites coupures).

Dans les deux cas, la dimension de la coupure diminue et, donc, n'est plus celle recherchée. Cela se traduit par un produit plus fin et une plus forte proportion de déclassés à cette dimension. Il faut garder présent à l'esprit que la granularité, et surtout sa constance durant tout un chantier, est la propriété la plus importante.

Granulats, origines et caractéristiques

Les granularités produites doivent se situer à l'intérieur d'un fuseau assez étroit pour garantir un niveau de qualité suffisant (figure 3.5).

L'obtention d'une granularité homogène est facilitée par la séparation en classes granulaires (2 ou 3) qui seront ensuite recomposées.

Le concassage, obligatoire pour les roches massives, n'interviendra pour les alluvions que pour corriger la granularité ou pour utiliser les éléments supérieurs à 40 mm et en faire des granulats pour assises de chaussées qui exigent une certaine proportion de concassés.

Le rôle du concassage est de réduire les dimensions des éléments pour obtenir la granularité souhaitée et, accessoirement, pour améliorer leur forme.

Les concasseurs sont basés sur trois principes :

- rupture par écrasement entre deux pièces métalliques, dont l'une est mobile par translation (mâchoires) ou par rotation (giratoires) ;
- rupture par chocs contre des pièces mobiles en rotation (marteaux, percussions, soles tournantes) ;

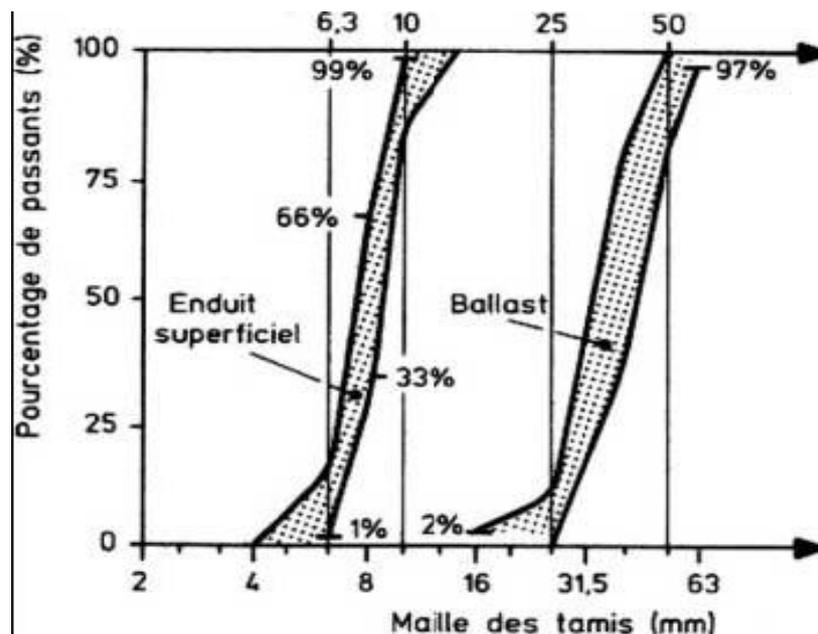


Figure 3.5 – Exemple de fuseaux de spécifications. [23]

— rupture sous l'action de charges libres (boulets, barres).

La granularité produite par un concasseur dépend :

- de la granularité des produits d'entrée ;
- du débit d'alimentation ;
- de l'usure des pièces broyantes.

La figure 3.6 donne un schéma classique d'installation simple. Les parties M et C sont caractéristiques des installations de roches massives et les parties A, ou A et C, sont communes pour les alluvions.

Le couplage concasseur-crible est un ensemble complexe qui se trouve encore compliqué par d'éventuels recyclages des plus gros éléments. On comprend alors que l'art du carrier n'est pas un vain mot, et que les asservissements qui commencent à se développer ne sont que le début d'une longue évolution qui conduira un jour à l'automatisation de ces fonctionnements. Elle seule pourra garantir une meilleure fiabilité des produits.

Le lavage, omniprésent dans les gisements de roches alluvionnaires où l'eau ne manque pas, est soit une exception en roche massive (débouillage en amont du débiteur), soit utilisé pour débarrasser les gravillons de leurs fines de surface.

Le lavage des alluvions se fait en partie naturellement par l'extraction sous eau, mais il permet aussi une classification des sables en réalisant des séparations, impossibles à effectuer par criblage classique, entre 10 et 150 μm .

Les modes de traitements utilisent des courants d'eau entraînant, par gravité, par centrifugation, par courants de surface ou ascendants, ou par vibrations, la séparation sable-eau polluée.

Les eaux de lavage nécessitent une récupération (bassins de décantation), voire un traitement pour concentrer les boues afin qu'elles occupent moins de place.

Les fonctions annexes assurent les liaisons entre les appareils, la mise en stock et l'expédition. Les flux de matériaux sont assurés par les bandes transporteuses, les régulations d'alimentation par des alimentateurs doseurs.

La mise en stock (silos, trémies, stocks au sol), souhaitable après le débiteur pour créer une réserve de fonctionnement, est obligatoire pour les produits finis.

Le dépoussiérage se justifie pour des raisons de santé du personnel, d'environnement et pour éviter les dommages aux matériels.

3.3.3 Carrières et environnement

Les granulats sont des matériaux dont on ne saurait se passer et cette notion est trop souvent oubliée du grand public, qui ne ressent l'impact des carrières qu'à travers les atteintes qu'elles apportent à l'environnement.

Les granulats sont des matériaux bon marché, et le développement des contraintes au niveau de leur production ne peut qu'entraîner un renchérissement des produits.

L'exploitation des carrières ne conduit pas à terme, comme beaucoup de gens semblent le croire, à une stérilisation d'une surface qui peut être considérable. Ce n'est qu'un épisode de

Granulats, origines et caractéristiques

l'occupation du sol qui se conclut, à plus ou moins long terme, par une nouvelle affectation dont bénéficie la collectivité : bases de loisirs, espaces sportifs, bassins de pêche, terres agricoles, opérations d'urbanisme, bassins d'alimentation en eau, colonisations biotopiques, aménagement paysager, stockage contrôlé de déchets.

Les actions envisageables sur la réduction des nuisances, associées aux multiples possibilités de réaménagement, montrent que la carrière n'a qu'un effet nuisible temporaire et réductible qui, à moyen et longs termes, sera toujours bénéfique pour la collectivité.

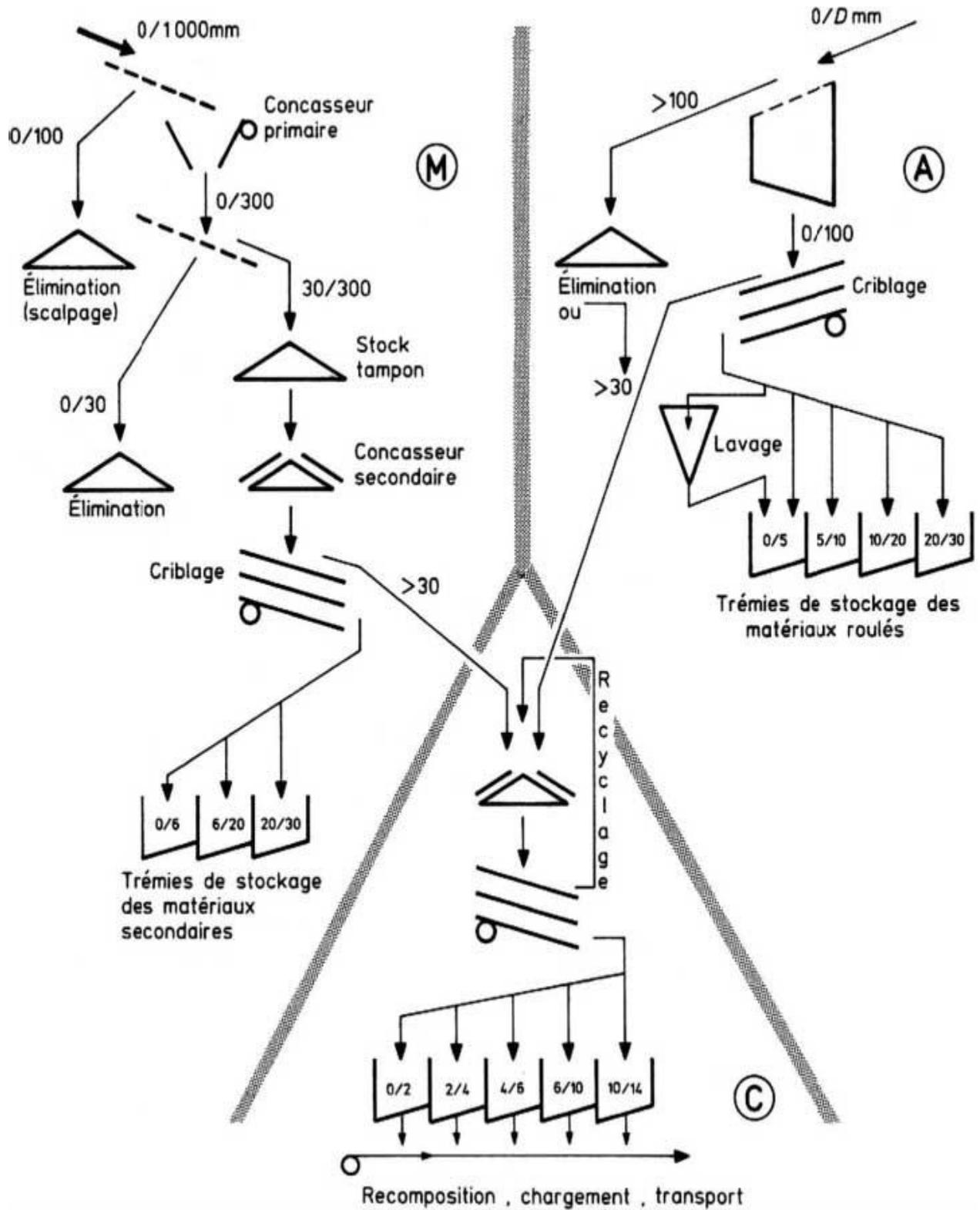


Figure 3.6 – Schéma d'une installation d'élaboration de granulats [23]

3.4. Utilisation des granulats

3.4.1 Utilisations courantes

Mis à part les drains, où l'on s'intéresse à une propriété de transfert de l'eau à travers les granulats en recherchant un assemblage granulaire à forte porosité, toutes les autres utilisations tendent au contraire à concevoir des assemblages granulaires à faible porosité et donc à forte compacité. Les objectifs recherchés sont ici certaines caractéristiques mécaniques : module de déformation élevé pour les granulats non liés et résistance à la traction élevée pour les granulats liés. L'obtention de cette compacité est due à trois facteurs : la granularité, le compactage, l'adjonction de liant.

La granularité conditionne la porosité du mélange. Si tous les grains avaient la même dimension, on aurait une porosité maximale de 30 %, s'ils étaient répartis suivant une courbe discontinue, on aurait une porosité minimale de 3 %. Mais on ne sait pas les arranger d'une façon optimale et il n'est pas économique de réaliser une telle granularité. On va donc se trouver avec des granularités continues telles qu'elles existent dans la nature ou telles que les produisent les concasseurs qui, en se rapprochant des courbes de Talbot (figure 2.20) conduisent, sur le plan pratique, aux plus grandes compacités.

Le compactage est obligatoire pour toutes les techniques utilisant des graves, traitées ou non, pour les assises de chaussées et a pour but d'améliorer la mise en place des éléments, et donc la compacité. Cette opération s'effectue toujours à teneur en eau optimale.

À noter qu'une roche trop tendre risque de voir sa granularité évoluer au compactage, ce qui amènerait le mélange vers une courbe trop sableuse et donc moins dense. Dans ce cas, il faut savoir choisir une granularité plus grenue (courbe plus creuse) pour qu'elle soit optimale après compactage.

Pour les bétons hydrauliques, l'obtention, avant prise, d'un mélange très plastique rend la phase de compactage moins importante ; l'utilisation de vibrations a plus pour rôle le remplissage parfait des coffrages.

L'adjonction de liant vient contribuer à la granularité, mais surtout apporter au mélange des forces de liaisons intergranulaires qui accroissent sa résistance à la traction.

La granularité est donc, dans tous les cas, le paramètre fondamental.

Elle se détermine après lavage sous eau, par tamisage à sec, entre 80 μm et 80 mm. En dessous de 80 μm la loi de Stokes est largement utilisée.

La résistance mécanique des granulats, tant qu'elle reste supérieure ou égale à celle du composite que l'on réalise, ne joue aucun rôle, sauf d'entraîner une évolution au compactage,

ou si le composite est soumis à une action mécanique d'usure ou de choc (couches de surface des chaussées, ballasts qui nécessitent des granulats plus durs).

Cette résistance est mesurée par l'essai Los-Angeles (action de chocs dans un broyeur à boulets) et par l'essai Micro-Deval (usure par frottements en présence d'eau).

La propreté des sables est aussi un paramètre fondamental.

Les argiles représentent la pollution la plus fréquente, leur présence entraîne toujours une diminution de résistance (figure 3.7) et il est prudent de ne pas dépasser les seuils limites spécifiés pour chaque technique.

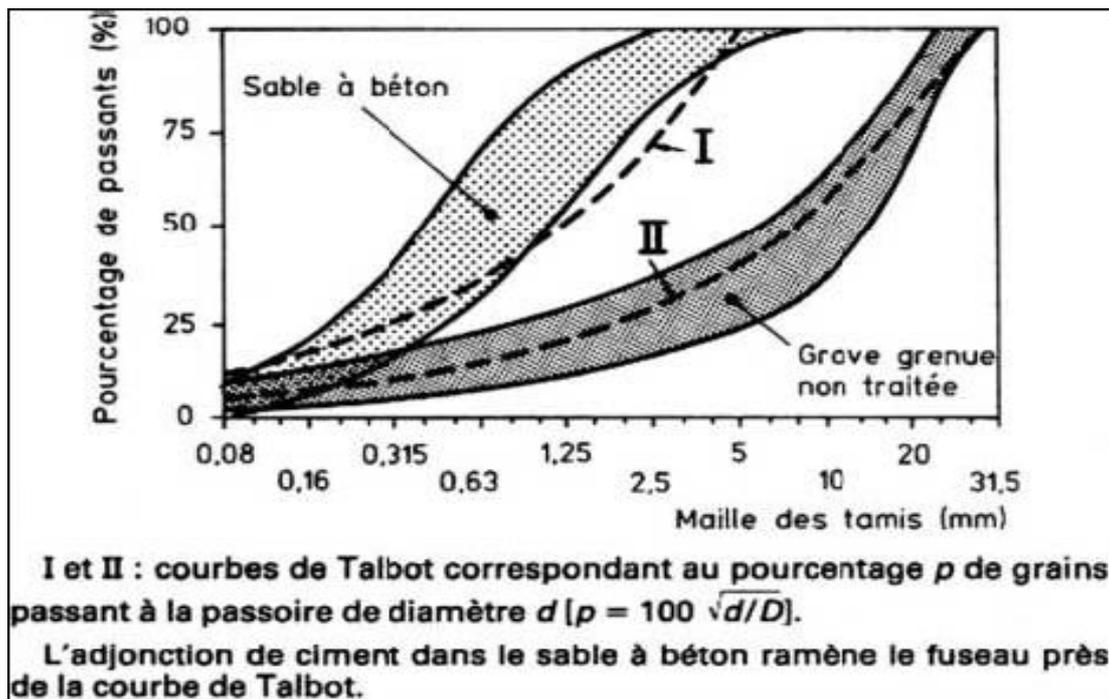


Figure 3.7 – Fuseaux et courbes de Talbot

La propreté des sables est évaluée par deux essais complémentaires.

L'équivalent de sable où le sable est agité dans une éprouvette en présence d'eau et d'un flocculant, puis sédimenté avec un contre-courant ascendant qui rassemble les argiles, mais aussi une bonne partie des fines, au-dessus des plus gros éléments. Le rapport hauteur du sable sur hauteur totale donne, en pour-cent, l'équivalent de sable (ES). Tant que cet essai donne de bons résultats ($ES > 60$) c'est que le sable est propre. Si le résultat est mauvais, cela peut être dû au piégeage accidentel de fines inertes (calcite, quartz) dans le flocculant ou à la présence d'un excès d'argiles. Pour le savoir on effectue alors, et seulement si le résultat de l'ES est mauvais, un essai dit au bleu basé sur l'adsorption de bleu de méthylène qui ne se fixe que sur les argiles.

Il existe d'autres caractéristiques des granulats qui n'ont d'importance que pour des usages particuliers qui sont précisés dans le tableau 3.4.

3.4.2 Utilisations particulières

Les granulats lourds sont en général des minerais ou des métaux. Certains minerais sont utilisés pour la fabrication de bétons lourds ou destinés à assurer une protection contre les rayonnements. La barytine (SO_4Ba) et la magnétite (Fe_3O_4), avec des masses volumiques comprises entre 4 et 5 g/cm^3 , sont le plus couramment utilisées. On trouvera une liste non limitative de ces granulats dans l'article Structure des réacteurs nucléaires.

Les granulats légers proviennent de l'expansion d'argiles, de schistes, de verres et de laitiers, de pouzzolanes et plus rarement des laves poreuses que sont les ponces.

Les granulats utilisés pour les drains ont des granularités très serrées comme les gravillons pour enduits ou les ballasts.

Le choix de la granularité dépend de la charge des eaux à drainer, d est supérieur à 10 mm pour une eau chargée en sable et en argiles, d est indifférent pour des eaux non chargées. La résistance mécanique n'intervient que si le drain est sollicité ; c'est le cas des ballasts, par exemple, ou un coefficient Los-Angeles inférieur à 15 (résistance aux chocs) est exigé.

Les granulats réfractaires sont représentés par les roches silicatées qui résistent en général jusqu'à 1 000 °C ; les basaltes ont le meilleur comportement dans ce domaine . Au - delà de 1 000 °C il faut faire appel à des granulats particuliers : corindon (Al_2O_3) naturel ou artificiel ou bauxite calcinée à 1 600 °C.

Les granulats anti-usure et en général anti-dérapants sont les plus riches en quartz : quartzites, certains microgranites et les granulats artificiels comme le corindon et la bauxite calcinée.

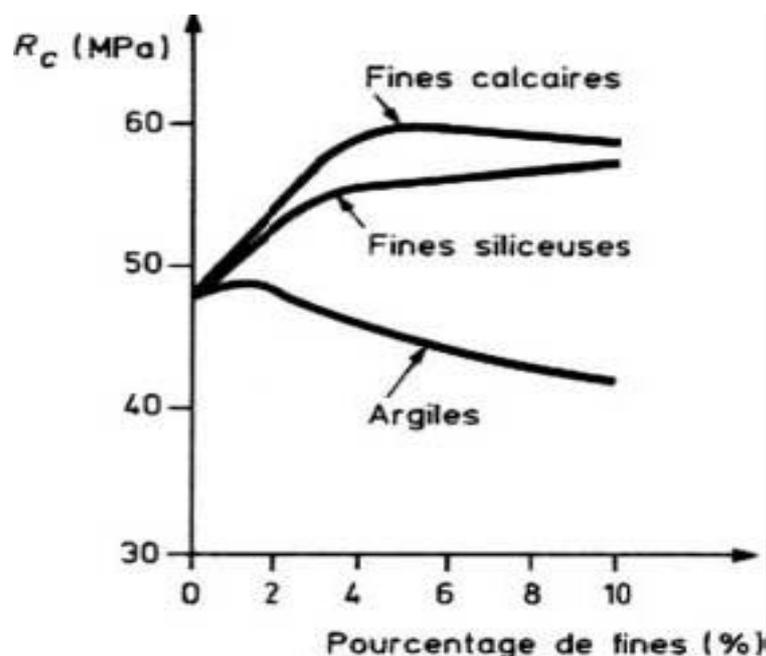


Figure 3.8 – Variation de la résistance en compression R_c d'un mortier en fonction de la nature des fines

Tableau 3.4 Importance des propriétés des granulats en fonction des techniques et limites des valeurs spécifiées et couleurs des roches

Tableau 4 – Importance des propriétés des granulats en fonction des techniques et limites des valeurs spécifiées									
Propriétés (1)	Bétons hydrauliques		Graves			Bétons bitumineux		Enduits superficiels Clous	Ballasts
	bâtiments	chaussées	non traitées	hydrauliques	bitume	liaison support	roulement		
Granularité	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Forme (%)	m ≤ 30	m ≤ 30	*	*	*	m ≤ 20	F ≤ 15 ≤ 20	F ≤ 10 ≤ 20	m ≤ 14
Angularité (2)	*	*	F 0 à 60 % D	F 0 à 100 % D	F 0 à 100 % D	F 30 % D à 4 D	F 60 % D à 4 D	F 100 % D à 6 D	F pas d'alluvions
Propreté des sables (%)	F ≥ 80 ≥ 85	F ≥ 75 ≥ 85	F ≥ 50	F ≥ 50	F ≥ 60	F ≥ 60	F ≥ 60	*	*
Propreté des gravillons (%)	m ≤ 2	m ≤ 2	f ≤ 2	f ≤ 2	m ≤ 2	F ≤ 2	F ≤ 1	F ≤ 0,5 ≤ 2	F 0,8
Matières organiques	F	F	*	F	*	*	*	*	*
Réaction alcalis-granulats	F	f	*	*	*	*	*	*	*
Résistance aux chocs (%)	m ≤ 25 ≤ 40	f ≤ 25 ≤ 40	m ≤ 25 ≤ 40	m ≤ 30 ≤ 40	m ≤ 25 ≤ 40	F ≤ 20 ≤ 30	F ≤ 20 ≤ 25	F ≤ 15 ≤ 25	F ≤ 15
Résistance à l'usure (%)	f ≤ 20 ≤ 35	F ≤ 20 ≤ 35	m ≤ 20 ≤ 35	m ≤ 25 ≤ 35	m ≤ 20 ≤ 35	F ≤ 15 ≤ 25	F ≤ 15 ≤ 20	F ≤ 10 ≤ 20	F ≤ 10
Résistance au polissage	*	m ≥ 0,50 ≥ 0,45	*	*	*	*	F ≥ 0,55 ≥ 0,50	F ≥ 0,55 ≥ 0,50	*
Friabilité des sables (%)	*	F ≤ 20 ≤ 40	*	*	*	*	*	*	*
Porosité Absorption d'eau (%)	m ≤ 2 ≤ 5	m ≤ 2	*	*	m	F	F	*	*
Gel (%)	f ≤ 50	f ≤ 50	m	m	f	f	*	*	*
Homogénéité (%)	F ≥ 97	F ≥ 97	*	*	*	*	m	F	F ≥ 94

(1) Importance forte : F, moyenne : m, faible : f et sans objet : *
Dans certains cas, on a deux limites spécifiées.

(2) 0 à x % D : proportion de matériaux supérieurs à D qui ont été concassés.

Tableau 5 – Couleurs approximatives des principales roches						
Couleurs	blanc	crème, beige, ocre	rose, rouge	verdâtre	gris	noir
Roches	Silex chauffés Calcaires	Alluvions Silex chauffés Calcaires	Granites Microgranites Rhyolites Pouzzolanes Grès	Microdiorites Diorites Dolérites Amphibolites	Granites Microgranites Ponces Quartzites Calcaires	Calcaires Basaltes Gabbros

Les granulats anti-corrosion doivent résister aux produits chimiques : c'est le cas de tous les silicates.

Des granulats abrasifs sont fabriqués à partir de sables de dunes qui contiennent plus de 80 % de quartz, de corindon ou de divers carbures métalliques.

L'utilisation des parties les plus fines (80 μm) sous forme de charge couvre un très large domaine : papeterie, alimentation pour bétail, colles, caoutchoucs, cosmétiques, etc.

Les architectes recherchent souvent des granulats dits architectoniques, intéressants par leur forme (alluvionnaires roulés) ou par leur couleur. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de répertoire des couleurs des granulats, les tendances les plus connues sont données dans le tableau 3.4.

3.5. Propriétés des roches exploitées

Les granulats empruntent aux roches dont ils sont issus une grande partie de leurs propriétés et en particulier toutes leurs caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire celles qui dépendent de la composition minéralogique et de la texture pétrographique.

3.5.1 Minéraux de base

Les roches sont constituées par des assemblages de minéraux.

Les minéraux les plus répandus dans l'écorce terrestre sont des silicates (environ 90 %). Le reste comprend des carbonates, des oxydes métalliques, des sulfates, des sulfures, etc.

Silicates

Les silicates sont essentiellement des arrangements géométriques d'ions oxygène, groupés par quatre autour d'ions silicium (tétraèdres).

Des ions silicium sont parfois remplacés par des ions aluminium, l'équilibre des charges électriques étant alors assuré par des ions potassium, sodium, calcium, etc. Le type d'arrangement caractérise la famille à laquelle appartient le silicate. Les proportions d'ions silicium et aluminium, l'existence d'ions fer, magnésium, etc., introduisent des variétés plus ou moins différenciées au sein de chaque famille.

Le quartz est le représentant le plus commun de la silice. Il appartient à la famille des tectosilicates, à tétraèdres disposés en charpente. C'est un minéral inaltérable, très dur (dureté Vickers de 1 280 kg/mm²), incolore et à éclat gras. Il se trouve dans certaines roches magmatiques, dans des roches sédimentaires, où il est parfois le seul constituant, et dans des roches métamorphiques.

Il convient de préciser que l'essai Vickers consiste à faire pénétrer une pointe diamantée en forme de pyramide à base carrée dans une face du minéral étudié, et que la dureté Vickers est définie par le rapport de la charge appliquée à la surface de l'empreinte produite.

Les feldspaths sont aussi des tectosilicates. Ils sont potassiques (orthose, microcline, etc.), sodi-potassiques (anorthose), sodi-calciques (série isomorphe continue des plagioclases allant de l'albite à l'anorthite), ou moins riches en silice (feldspathoïdes). Ce sont des minéraux

Granulats, origines et caractéristiques

altérables, moyennement durs (750 kg/mm²), incolores, roses ou blancs, et brillants suivant des plans de clivage bien développés. Ils se rencontrent dans la plupart des roches magmatiques et dans beaucoup de roches métamorphiques.

Les micas appartiennent à la famille des phyllosilicates, à tétraèdres disposés en feuillets.

Ce sont des minéraux altérables, très tendres (85 kg/mm²), apparaissant en prismes aplatis à clivages parfaits et à débit en minces lamelles flexibles et élastiques. Ils sont alumineux blancs et nacrés (muscovite) ou ferro-magnésiens noirs et brillants (biotite). Ils existent dans les roches magmatiques et métamorphiques en proportions très variables.

Les pyroxènes appartiennent à la famille des inosilicates, à tétraèdres disposés en chaîne droite simple. Ce sont des minéraux ferro-magnésiens (augite, diopside, etc.), altérables, moyennement durs (710 kg/mm²), de couleur sombre et à éclat métallique, se présentant en prismes allongés. Ils se trouvent dans les roches magmatiques sans quartz.

Les amphiboles sont aussi des inosilicates, mais à tétraèdres disposés en deux chaînes droites. Ce sont des minéraux ferro-magnésiens (hornblende, actinote, etc.), altérables, moyennement durs (730 kg/mm²), de couleur sombre sans éclat particulier, se présentant en aiguilles ou en fibres. Elles se rencontrent dans les roches magmatiques pauvres en quartz et dans les roches métamorphiques.

Les péridots appartiennent à la famille des nésosilicates, à tétraèdres isolés. Ce sont des minéraux ferro-magnésiens (olivine), altérables, moyennement durs (800 kg/mm²), de couleur verdâtre et à éclat vitreux, apparaissant en prismes trapus. Ils existent dans les roches magmatiques sans quartz.

Les argiles sont des phyllosilicates hydratés (kaolinite, illite, montmorillonite, chlorite, etc.). Elles résultent de l'altération par hydrolyse des silicates altérables.

Par ailleurs, les silicates de métamorphisme, tels les silicates d'alumine anhydres (andalousite, disthène, sillimanite) et les silicates alumineux ferro-magnésiens (cordiérite, staurotide), ont leurs tétraèdres unis entre eux par des ions aluminium. Ce sont des minéraux stables, très caractéristiques des roches métamorphiques.

Minéraux non silicatés

Les carbonates sont nombreux mais seuls deux d'entre eux sont importants. La calcite est un carbonate de calcium, très tendre (110 kg/mm²), de couleur blanchâtre et à éclat vitreux, se présentant en cristaux xénomorphes ou automorphes à clivages parfaits et à macles simples fréquentes. Elle fait effervescence avec un acide dilué à froid. Elle se trouve essentiellement dans des roches sédimentaires, comme minéral constitutif des calcaires par exemple, et dans

Granulats, origines et caractéristiques

certaines roches métamorphiques. Son polymorphe l'aragonite, métastable à température ordinaire, se transforme généralement en calcite.

La dolomite est un carbonate double de calcium et de magnésium, moyennement tendre (350 kg/mm²), de couleur blanchâtre à jaunâtre et à éclat vitreux, apparaissant en prismes nets à clivages parfaits et à macles simples rares. Elle ne fait pas effervescence avec un acide dilué à froid. Elle se rencontre dans des roches sédimentaires.

Les oxydes d'aluminium (corindon) et de titane (ilménite, rutile) sont accessoires dans les roches magmatiques et métamorphiques.

Les oxydes de fer (hématite, magnétite) sont plus répandus mais toujours accessoires dans ces roches.

Le gypse, et l'anhydrite son équivalent non hydraté, sont des sulfates de calcium très tendres (75 kg/mm²), blanchâtres en masse mais translucides lorsqu'ils sont bien cristallisés. Ils sont accessoires dans les roches sédimentaires.

La pyrite est un sulfure de fer, relativement dur (1 050 kg/mm²), de couleur jaune d'or et à éclat métallique. Elle est accessoire dans toutes les roches.

3.5.2 Roches magmatiques

■ Les roches de la famille des granites sont de teinte claire. Elles renferment obligatoirement du quartz et un feldspath potassique ; elles contiennent également des micas et des feldspaths sodiques, et accessoirement des amphiboles.

Les granites sont des roches plutoniques grenues très communes (figure 3.9 voir annexe C, au microscope optique polarisant). Leur résistance est conditionnée en grande partie par la dimension de leur grain ; de façon générale, plus le grain est fin, meilleure est la résistance.

Les microgranites ont une structure microgrenue, le plus souvent porphyrique avec de grands cristaux de feldspath ou de quartz. La plupart possèdent une bonne résistance.

Les rhyolites sont des roches volcaniques, à structure fluidale plus ou moins sphérolitique par dévitrification. Leur texture extrêmement fine les rend peu perméables donc peu sensibles aux altérations et de ce fait très résistantes.

Les tufs rhyolitiques sont des produits de projections volcaniques d'excellente résistance lorsque le ciment qui les lie est bien développé.

■ Les roches de la famille des diorites sont de teinte blanchâtre à noirâtre. Elles sont composées essentiellement de feldspaths à dominante sodique et d'amphiboles, avec un peu de micas, les pyroxènes étant accessoires et le quartz rare voire absent.

Les diorites sont des roches plutoniques grenues, dont la résistance dépend principalement de la dimension de leur grain.

Granulats, origines et caractéristiques

Les microdiorites ont une structure microgrenue avec des minéraux finement enchevêtrés, ce qui leur confère généralement une bonne résistance.

Les andésites sont des roches volcaniques, à structure microlitique fluidale, à aspect scoriacé et vacuolaire. Leur résistance est fonction de leur porosité.

■ Les roches de la famille des gabbros sont de teinte sombre. Elles sont constituées essentiellement de feldspaths à dominante calcique et de pyroxènes, avec souvent des amphiboles et parfois des péridots, les micas étant rares et le quartz totalement absent.

Les gabbros sont des roches plutoniques grenues facilement altérables, ce qui détériore grandement leur résistance. Les faciès sains s'avèrent néanmoins de bonne qualité.

Les microgabbros ont une structure microgrenue, mais sont fréquemment altérés. Leur résistance varie selon leur degré d'altération.

Les ophites, quant à elles, se distinguent par leur structure particulière à grands cristaux enchevêtrés de pyroxènes englobant des petites lattes de plagioclases calciques, ce qui leur donne une excellente qualité ; cependant, elles sont très souvent altérées et prennent alors une couleur verte (serpentine).

Les basaltes sont des roches volcaniques très communes (figure 3.10 voir annexe C), à structure microlitique voire vitreuse dans certains cas, à aspect compact mais quelquefois vacuolaire. La plupart sont très résistants mais sensibles au polissage.

3.5.3 Roches sédimentaires

Les grès sont des roches détritiques terrigènes, cohérentes, communes, de teinte claire, composées essentiellement de grains de quartz plus ou moins arrondis liés par un ciment siliceux (figure 3.11 voir annexe C). Leur résistance est conditionnée en grande partie par la dimension des grains de quartz et l'abondance du ciment siliceux.

Les calcaires sont des roches carbonatées très communes, constituées essentiellement de calcite et de dolomite en proportions variables : calcaires purs (95 à 100 % de calcite), calcaires magnésiens (5 à 10 % de dolomite), calcaires dolomitiques (10 à 50 % de dolomite).

Outre la composition minéralogique, le milieu et les conditions de sédimentation, la structure et la texture, l'importance des fossiles, sont aussi à l'origine d'une grande diversité de calcaires et en conséquence d'une large gamme de résistances (figure 3.11 voir annexe C). En revanche, les calcaires ont généralement tendance à se polir et ce d'autant plus rapidement que leur pâte est plus riche en calcite et que leur grain est plus fin (la présence de quartz peut certes ralentir ce processus de polissage, mais elle accroît alors l'abrasivité).

Les matériaux alluvionnaires sont des roches détritiques terrigènes, non consolidées, très communes, de composition minéralogique extrêmement variée en raison de la diversité

géologique des bassins versants des cours d'eau qui les ont déposées. Ce sont des mélanges de fragments et de débris, qui proviennent de l'érosion des roches magmatiques et métamorphiques et/ou des roches sédimentaires existantes. Ils se caractérisent de ce fait par une grande hétérogénéité tant pétrographique que granulométrique, laquelle se traduit par un large éventail de résistances.

3.5.4 Roches métamorphiques

Les gneiss résultent de la transformation des granites (figure 3.12 voir annexe C). Ce sont des roches à grain moyen ou grossier et à foliation nette caractérisée par une alternance de lits clairs (quartz, feldspaths) et de lits sombres (micas principalement). Leur résistance dépend de la dimension du grain ainsi que de la proportion et de la continuité des lits de micas.

Les leptynites dérivent du métamorphisme de certains granites. Ce sont des roches homogènes à grain fin, compactes, de teinte claire, à foliation peu marquée, riches en quartz et feldspaths mais pauvres en micas. Leur résistance est de ce fait meilleure que celle des gneiss.

Les amphibolites résultent de la transformation des basaltes (figure 3.13 voir annexe C). Ce sont des roches très dures à texture massive et de teinte sombre. Elles sont constituées essentiellement de cristaux d'amphiboles visibles à l'oeil nu et plus ou moins ordonnés dans les plans de schistosité ; des feldspaths calciques sont toujours présents, mais peu abondants et parfois groupés en lits.

Les quartzites proviennent de la métamorphisation des grès. Ce sont des roches siliceuses compactes, à cassure conchoïdale lisse ou esquilleuse, de couleur claire et d'aspect gras, où les anciens grains détritiques de quartz sont englobés dans des plages de quartz néoformé. Les quartzites sont généralement résistants mais très abrasifs.

Les cornéennes témoignent d'un métamorphisme de contact.

Elles correspondent à des faciès haute température, générés par l'intrusion d'un pluton. Ce sont des roches très dures à texture massive, non fissiles, à patine et à cassure d'aspect corné. Elles sont composées de fins cristaux fortement engrenés et enchevêtrés de quartz, de feldspaths et, en proportions variables, de micas, d'amphiboles et de pyroxènes.

3.6-Granulats. Production et utilisations : [48]

3.6.1 Production des granulats

Les granulats naturels sont produits dans des carrières (figures 3.14 et 3.15 voir annexe C), et chacune d'elles occasionne une occupation temporaire du sol, c'est-à-dire une parenthèse dans l'histoire du site.

Rappel de définitions

Les granulats sont des matériaux granulaires de dimensions n'excédant pas 125 mm, auxquels s'ajoutent les enrochements de dimensions supérieures à 125 mm mais de masses inférieures ou égales à 15 tonnes. Ils sont désignés par leurs plus petites et plus grandes dimensions d et D , l'intervalle d/D étant appelé classe granulaire. Cette désignation admet que des éléments puissent être retenus sur un tamis à mailles carrées d'ouverture D (tamis D) et que d'autres puissent passer au travers du tamis d , dans les limites normalisées permises.

Trois grandes familles de granulats sont ainsi définies :

- les sables, où $d = 0$ et ; $2 < D < 6,3$ m m
- les gravillons, où et ; $d > 1$ m m et . $2 < D < 90$ m m
- les graves, où $d = 0$ $2 < D < 90$ m m

Les fines constituent leur fraction granulaire au travers du tamis de 0,063 mm.

Les granulats les plus couramment utilisés dans le bâtiment et le génie civil ont une masse volumique réelle comprise entre 2 et 3 Mg/m³.

Avant toute ouverture de carrière, l'accès au gisement représente une tâche administrative et environnementale de grande ampleur qui peut facilement durer 5 à 10 ans.

La période de production proprement dite est généralement plus longue dans les roches massives que dans les roches meubles .

Enfin, lorsque le gisement est épuisé, ou au fur et à mesure de son exploitation, le site fait l'objet d'une remise en état conforme au projet et au plan de financement établis selon la législation en vigueur, laquelle est extrêmement contraignante en matière de protection de l'environnement.

L'implantation d'une unité nouvelle, ou la transformation d'une unité existante, nécessite la réalisation d'études préalables visant notamment à :

- caractériser le gisement sur les plans géologique et géotechnique ;
- estimer le marché potentiel en termes quantitatif et qualitatif ;
- définir les moyens techniques qu'il convient de mettre en œuvre dans le cadre d'une démarche industrielle ;
- rechercher la rentabilité financière du projet.

La connaissance des conditions de gisement et la maîtrise des outils de production, optimisée grâce au développement de la mécanisation et à l'avènement de l'automatisation, concourent à accroître la productivité des exploitations et à obtenir la régularité recherchée des granulats.

La production de granulats artificiels ou recyclés, quant à elle, a le mérite de ne pas consommer de ressources naturelles et de ne pas modifier la topographie des terrains d'accueil des installations.

De manière générale, l'élaboration des granulats comprend deux opérations principales distinctes : l'extraction et le transport vers les unités de traitement d'une part, le traitement proprement dit d'autre part.

- Extraction et transport vers les unités de traitement

- Gisements de roches massives

L'extraction peut être exécutée soit sur un seul front par tranches horizontales successives (figure 3.16 voir annexe C), soit sur plusieurs fronts par tranches horizontales simultanées. La première méthode est la plus fréquemment appliquée, la seconde étant plus particulièrement réservée aux gisements de moyenne puissance mais de faible épaisseur en regard de leur superficie. Selon la topographie du site, l'extraction progresse à flanc de coteau ou en fosses emboîtées.

■ La découverte consiste à mettre à nu la partie saine de la roche à exploiter. La terre végétale est d'abord décapée au boteur ou au scrapeur puis disposée en cordons à la périphérie du gisement ou transportée sur une aire de dépôt, pour être éventuellement réutilisée plus tard au moment du réaménagement du site.

Les matériaux stériles et les parties altérées du gisement sont également mis en dépôt (ou éventuellement réutilisés comme matériaux de remblai). Cette opération, parfois précédée d'un pré-minage, est réalisée au boteur voire à la pelle hydraulique avec chargement sur tombereau rigide lorsque le dépôt est éloigné.

La partie saine du gisement étant naturellement fracturée, le géologue peut en dresser une carte à deux dimensions en observant le front de taille, et, à l'aide de logiciels disponibles sur le marché, en avoir une idée à trois dimensions.

■ L'abattage a pour but de réduire la roche saine en place en blocs de tailles compatibles avec les possibilités des engins de chargement et de transport d'une part, et avec le gabarit du concasseur primaire d'autre part.

L'abattage est réalisé par un tir à l'explosif disposé dans des trous forés, alignés sur plusieurs plans parallèles au front de taille, qui peut être incliné jusqu'à 20 ° par rapport à la verticale. La détonation de l'explosif transmet au massif rocheux une puissante onde de choc, qui broie la roche dans son voisinage immédiat, initie une fracturation radiale au-delà et engendre une fracturation parallèle à toute surface libre sur laquelle elle se réfléchit. Elle produit également

Granulats, origines et caractéristiques

un gaz à haute température et haute pression, qui prolonge les fractures radiales et éjecte les blocs fracturés.

La hauteur du front de taille est limitée par la réglementation française à 15 m, pour prévenir les risques de déviation de forage.

La largeur de la tranche à abattre, appelée banquette, est en général de 3 à 6 m. La maille de foration est la surface comprise entre 4 trous d'abattage. Elle est généralement comprise entre 10 et 20 m² (la maille courante étant de 3 m × 4 m), suivant la blocométrie désirée.

La foration des trous associe un mouvement de descente, par percussion d'un marteau muni d'un outil taillant, à un mouvement de rotation. Les outils taillants peuvent forer entre quelques dizaines et plusieurs centaines de mètres, suivant la dureté et l'abrasivité de la roche : un quartzite est très abrasif, un calcaire l'est peu.

Les explosifs utilisés pour les tirs peuvent être soit en cartouche (dynamites ou émulsions), soit en vrac (pulvérulents, ou éventuellement fabriqués sur place dans des unités mobiles à partir de nitrate et de fuel, et plus ou moins chargés de poudre d'aluminium lorsque les trous sont remplis d'eau). Cette seconde solution a l'avantage d'éviter au carrier les contraintes liées à la sécurité et à la sûreté (prévention du vol) du transport et du stockage des explosifs.

Les quantités utilisées (50 à 150 g/t de matériau abattu) dépendent des caractéristiques du gisement et sont déterminées par la maille de foration et le diamètre des trous.

Des microretards à l'amorçage, entre les plans de forage, permettent d'optimiser la répartition de la taille des blocs abattus et surtout de diminuer fortement l'amplitude des vibrations du sol qui se propagent vers l'intérieur comme vers l'extérieur de la carrière, en étalant les détonations dans le temps.

Une fragmentation secondaire est quelquefois nécessaire sur les blocs trop gros pour la suite des opérations. Elle est réalisée le plus souvent à l'aide d'un marteau brise roche hydraulique (BRH), ou, lorsque cela est permis, par pétardage en introduisant des cartouches d'explosif dans des trous préalablement forés.

■ Après chaque tir, les matériaux abattus sont exploités en butte par un engin de chargement évoluant à leur pied. Lorsque les distances de transport sont inférieures à 150 m, il est possible d'utiliser une chargeuse sur pneumatiques assurant les fonctions chargement et transport vers le concasseur primaire. Pour des distances plus grandes, le transport est effectué par des tombereaux rigides ou dumpers de 35 à 50 t de charge utile ou par des tombereaux articulés lorsque les conditions de roulage sont difficiles.

-Gisements de roches meubles

Les gisements de roches meubles reposent sur un mur de substratum non exploitable et sont limités par un toit surmonté d'une découverte. Entre le mur et le toit, se situe le gisement proprement dit, dont l'épaisseur est appelée puissance.

Trois cas peuvent se présenter suivant les niveaux respectifs du mur, du toit et de la nappe d'eau qui baigne fréquemment une partie des gisements :

— si le niveau de la nappe est inférieur à celui du mur, le site est hors d'eau et le gisement est exploité à sec ;

— si le niveau de la nappe est supérieur à celui du toit, le site est immergé et le gisement est exploité sous eau ;

— si le niveau de la nappe est compris entre ceux du mur et du toit, le site est semi-immersé et le gisement est généralement exploité en deux phases distinctes.

■ La découverte est gérée comme pour les roches massives quand le site est hors d'eau. Lorsqu'il est immergé, on peut procéder à un rabattement de la nappe par pompage, si la perméabilité du terrain le permet ; sinon, le décapage de la découverte est généralement effectué, depuis le haut, à la pelle hydraulique équipée en rétro. La nature de la découverte peut être très différente de celle des matériaux exploitables (présence notamment de matière organique, de tourbe, de pyrite, très nocives surtout dans les bétons). Il est donc indispensable, là aussi, d'inclure la découverte dans le système qualité de la carrière.

■ En site hors d'eau, deux modes d'extraction sont possibles :

— en fouille, par pelle hydraulique équipée en rétro, pour des puissances de gisement n'excédant pas 4 m et lorsqu'il existe des zones indurées ;

— en butte, par chargeuse sur pneumatiques, pour la plupart des autres cas. Si la puissance du gisement dépasse toutefois 12 m, l'exploitation est conduite par paliers.

En site immergé, si le rabattement de la nappe est possible, on est ramené au problème précédent. Sinon, on utilise des dragues généralement à godets. Les matériaux sont traités sur la drague par criblage et lavage, ou évacués par bandes transporteuses flottantes. Lorsque la puissance du gisement est importante, on a recours à des dragues à grappin ou à des dragues suceuses.

En site semi-immersé, si le rabattement de la nappe est possible, on est ramené au cas du site hors d'eau. Si la puissance du gisement est supérieure à 10 m, on emploie des dragues.

Pour les autres cas, on utilise des engins à terre en bord de fouille :

— Pelle hydraulique équipée en rétro, pour les gisements pauvres en sables et à faible hauteur immergée (moins de 4 m) ;

— Dragueline disposant les matériaux en cordon en bord de fouille, pour qu'ils soient repris à la chargeuse après essorage ;

— excavateur à godets monté sur chenilles parallèles au front d'extraction, et évacuant les matériaux par transporteur orientable lorsque le gisement est homogène.

■ Outre les tombereaux rigides ou articulés, comme pour les roches massives, sont utilisés plus spécifiquement :

— le transport par convoyeurs (bandes transporteuses), de loin le plus fréquent ;

— le transport hydraulique sous forme de pulpe dans des tuyauteries flottantes ;

— le transport par eau à l'aide de barges, ou de bateaux trémies auto-déchargeants pour les granulats marins en particulier.

3.6.2 Traitement proprement dit

Une installation de carrière comprend plusieurs postes de fabrication, constitués par une succession d'opérations de fragmentation (concassage) et de classement (criblage) des matériaux, ainsi que des dispositifs de manutention (engins sur pneus et bandes transporteuses). Des stockages intermédiaires soit en trémies, soit en tas au sol avec reprise par extracteurs en souterrain ou par engins mobiles, assurent l'indépendance fonctionnelle des postes de fabrication.

Les opérations de réduction volumétrique peuvent éventuellement être complétées par un tripréalable, éliminant les éléments stériles, terreux et friables, et par des actions de lavage voire de débouillage, éliminant les éléments polluants argileux agglomérés entre eux ou collés à la surface des matériaux.

L'installation se compose généralement de deux ensembles distincts, l'étage primaire qui réduit les blocs d'abattage (roches massives) ou le tout-venant d'extraction (roches meubles), et l'usine d'élaboration, qui fabrique les produits finis. Les produits marchands sont ensuite stockés en trémies ou en tas dans l'attente d'être expédiés et commercialisés.

La conception d'une chaîne de concassage-criblage est conditionnée par les objectifs que l'on veut atteindre (quantités à produire, classes granulaires à obtenir) et les propriétés de la roche que l'on doit traiter (nature pétrographique et composition minéralogique, abrasivité et proportion d'éléments durs, résistance mécanique et fragilité). En outre, lorsque l'argilosité de la roche le nécessite, une unité de lavage est ajoutée à la chaîne de traitement.

-Concassage

Le concassage consiste à réduire la taille des morceaux de roches. Le choix du type et de la taille d'un appareil de concassage est fonction de la granularité d'entrée, de la charge circulante, et du débit de sortie.

Deux types d'appareils de concassage peuvent actuellement être mis en place :

- les appareils travaillant par compression, où les matériaux subissent une action répétée d'écrasement entre deux pièces (concasseurs à mâchoires, concasseurs giratoires) ;
- les appareils opérant par chocs, où les matériaux sont soit frappés violemment par un organe tournant à grande vitesse (concasseurs à percussion et axe horizontal), soit projetés sur un écran de fragmentation sous l'effet de la force centrifuge (concasseurs à projection et axe vertical).

Le concasseur à mâchoires (figures 3.17 et 3.18 voir annexe C) comprend une mâchoire fixe et une mâchoire mobile suspendue à un arbre excentrique muni d'un lourd volant d'inertie. La mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe lorsqu'elle descend ; elle s'en écarte lorsqu'elle monte, entraînant ainsi la chute des matériaux entrants. Dans les concasseurs à mâchoires dits à double effet, la partie inférieure de la mâchoire mobile décrit un mouvement horizontal.

Le réglage de la largeur minimale entre les deux mâchoires permet de maîtriser la granularité des produits sortants.

Le concasseur giratoire (figure 3.19 voir annexe C) réduit les matériaux entre un cône fixe extérieur et un cône mobile intérieur animé par un excentrique.

Les phases de compression-décompression que subissent les matériaux sont beaucoup plus nombreuses que celles générées par le concasseur à mâchoires et s'accompagnent d'attrition, ce qui tend à produire des formes plus isotropes.

Le concasseur à percussion et axe horizontal est constitué d'un rotor muni de pièces de chocs ou percuteurs, qui tourne à grande vitesse à l'intérieur d'une enceinte fermée équipée de plaques de chocs ou enclumes. Les percuteurs du rotor frappent les matériaux entrants et les projettent sur les enclumes de l'enceinte. Le réglage de la granularité des produits sortants est effectué en agissant sur la vitesse du rotor et l'espacement entre les percuteurs et les enclumes.

Le concasseur à projection et axe vertical (figure 3.20 voir annexe C) travaille principalement par chocs des matériaux entre eux. Le rotor tourne à grande vitesse et projette les matériaux entrants à la périphérie de l'appareil sur un talus de morceaux de matériaux. Il existe cependant d'autres machines, où les matériaux entrants viennent heurter des enclumes fixées

sur le stator. La granularité des produits sortants est essentiellement conditionnée par la vitesse du rotor.

- Criblage

Le criblage est l'opération qui permet de séparer un ensemble de grains d/D en au moins deux sous-ensembles d/m et m/D , d/m étant le passant au travers de la maille de criblage m et m/D le refus sur cette même maille de criblage m .

Deux fonctions principales peuvent être distinguées :

- le criblage technique, affecté à l'orientation de la charge circulante vers une unité de concassage et/ou de stockage ;
- le criblage classificateur, destiné au tri des produits finis suivant des caractéristiques dimensionnelles spécifiées.

Le criblage est le plus souvent effectué à l'aide d'un crible vibrant (figure 3.21 voir annexe C), constitué d'un arbre à balourd sur lequel sont fixées des toiles de criblage.

La toile de criblage est généralement faite de fils d'acier entrecroisés.

Toutefois, lorsque les matériaux sont très abrasifs, on utilise de préférence des panneaux de polyuréthane perforés plus résistants.

La surface de criblage est calculée à partir de certaines lois qui prennent en compte la maille de criblage, le débit recherché, la granularité du matériau à cribler, sa nature et son angularité ; plus la maille de criblage est petite, plus le débit est faible.

Des grilles fixes de scalpage, à barreaux longitudinaux, peuvent en outre être placées en amont du concasseur primaire, pour éliminer les matériaux indésirables (éléments fins contenant par exemple des argiles, etc.).

- Lavage

Le lavage a pour but d'éliminer les fines polluantes (argiles essentiellement), agglomérées entre elles ou collées à la surface des produits finis.

Les gravillons sont lavés sur crible par arrosage abondant (figure 3.22 voir annexe C).

Les sables peuvent l'être au moyen de l'un des quatre procédés ci-après :

- le séparateur à cône ; le sable est introduit par le centre du cône, l'eau et les fines argileuses sont évacuées par débordement et le sable est récupéré en bas du cône ;
- le classificateur à spirale (ou décanteur à vis) ; le sable est introduit au pied d'une vis sans fin inclinée, l'eau et les fines argileuses sont évacuées par débordement au pied de la vis et le sable est entraîné vers le haut par la vis ;

Granulats, origines et caractéristiques

— la roueessoreuse ; le sable est déversé dans une auge où il décante ; des godets perforés fixés sur une roue remontent ensuite le sable qui est récupéré dans une goulotte après renversement des godets, l'eau et les fines argileuses étant évacuées par débordement ;

— l'hydrocyclone ; le sable est introduit sous pression dans un cyclone tronconique ; une fois lavé, il est récupéré par le bas de l'appareil (sous-verse), l'eau et les fines argileuses étant évacuées vers le haut (sur-verse) par un orifice axial.

Les tout-venants sont lavés à l'aide d'un laveur débourbeur, cylindre métallique rotatif muni à l'intérieur de pales assurant le brassage des matériaux dans un courant d'eau. Le mouvement de rotation du cylindre est transmis par un train de pneumatiques sur lequel il repose.

Les gravillons lavés sortent d'un côté, et les boues sableuses sortent de l'autre pour être dirigées vers une installation de lavage des sables.

3.7. Protection de l'environnement

Les carrières sont souvent ressenties par le grand public au travers des atteintes qu'elles portent à l'environnement, par suite des nuisances qu'elles occasionnent et des bouleversements des sols et des paysages, qu'elles engendrent. Sous la pression des écologistes, les producteurs de granulats se sont mobilisés ; des progrès importants ont été accomplis en matière de réduction des bruits, des vibrations et des poussières, de traitement des eaux et des boues, de réhabilitation des sites de production, etc.

Parallèlement, la législation sur les carrières a été modifiée et renforcée dans le but de protéger efficacement le cadre de vie.

Désormais, toutes les exploitations, quels que soient les seuils de superficie et de production, sont soumises à autorisation, avec production d'une étude d'impact analysant les effets du projet sur l'environnement. Le dossier fait l'objet d'une enquête publique d'une durée d'un mois dans chacune des communes intéressées, puis est soumis pour avis à la commission départementale des carrières.

L'autorisation d'ouverture et d'exploitation est délivrée par arrêté préfectoral pour une durée maximale de trente ans renouvelable. Il y a en outre maintenant obligation, pour tout producteur de granulats, d'apporter des garanties financières destinées à la remise en état de son site, après exploitation, ou pendant celle-ci en cas de défaillance.

De plus, un schéma définissant les conditions générales d'implantation des carrières doit désormais être institué dans chaque département.

Ce schéma est élaboré par la commission départementale des carrières et approuvé par le préfet après avis du conseil général. Il doit prendre en compte les ressources et les besoins en matériaux du département et des départements voisins, la protection des sites et des milieux

naturels sensibles, la nécessité d'une gestion équilibrée de l'espace, tout en favorisant une utilisation économe des matières premières. Il fixe en outre les objectifs à atteindre en termes de remise en état et de réaménagement des sites. Les autorisations d'exploiter doivent bien évidemment être compatibles avec le schéma.

- obligation de faire une déclaration de début d'exploitation ;
- interdiction d'extraire dans le lit mineur des cours d'eau ;
- interdiction d'extraire à moins de 35 m des rives d'un cours d'eau ;
- tenue de plans d'exploitation mis à jour au moins une fois par an ;
- obligation de faire le nécessaire en matière de prévention des risques de pollution des eaux et de l'air, et de nuisance par le bruit et les vibrations ;
- obligation de remettre en état après exploitation.

3.8. Maîtrise de la qualité

La qualité d'un granulats, c'est d'abord un niveau de spécification pour un usage donné, c'est ensuite le maintien de ce niveau de spécification dans le temps.

Pour le producteur, tout cela nécessite la connaissance de son gisement, la maîtrise de sa chaîne de production, la caractérisation de ses produits fabriqués, l'établissement d'une fiche technique de synthèse et d'engagement pour chacun d'eux, la mise en place et l'application d'un plan d'assurance qualité.

■ Depuis le 1^{er} juin 2004, les normes européennes granulats harmonisées sont d'application obligatoire en France, les anciennes normes françaises étant retirées. En conséquence, le marquage CE des granulats entrant dans le champ de ces normes européennes est également devenu obligatoire à compter de cette date.

Trois normes européennes de spécifications des granulats intéressent plus particulièrement les domaines des chaussées et des bétons hydrauliques :

- NF EN 13242 Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et non traités ;
- NF EN 13043 Granulats pour mélanges hydrocarbonés et enduits superficiels ;
- NF EN 12620 Granulats pour bétons.

Ces normes européennes définissent des catégories ou classes pour chaque caractéristique de granulats, déterminées à partir d'essais européens normalisés.

Le marquage CE des granulats est issu du mandat M 125 que la Commission européenne a donné au Comité européen de normalisation.

Rappelons que le marquage CE des produits de construction permet de présumer la conformité des ouvrages vis-à-vis des exigences essentielles (stabilité et durabilité des

Granulats, origines et caractéristiques

ouvrages en particulier) de la directive européenne sur les produits de construction, mais dans la mesure seulement où ceux-ci sont correctement mis en œuvre.

À ce titre, le producteur est tenu d'appliquer un système de maîtrise de sa production, qui comprend notamment la réalisation d'essais initiaux de caractérisation et d'essais périodiques de vérification, ainsi que le traitement des non-conformités.

Le producteur a la responsabilité du marquage CE de ses granulats.

Il déclare qu'il maîtrise son système de production en appliquant toutes les dispositions prévues par les normes européennes granulats. Il établit ainsi une attestation de conformité, qui peut être :

- de niveau 4, s'il s'agit d'une simple déclaration de sa part ;
- de niveau 2+, si cette même déclaration s'appuie sur un audit d'inspection effectué par un organisme indépendant, notifié par un État membre.

Si le producteur peut choisir entre ces deux niveaux d'attestation de conformité pour mettre ses granulats sur le marché, les maîtres d'ouvrage tendent à imposer le niveau 2+.

Par ailleurs, si le marquage CE atteste d'un niveau de maîtrise du système de production, il ne peut seul constituer un gage de conformité des granulats aux spécifications d'usage d'un marché et n'exonère pas le maître d'ouvrage de la réalisation de ses contrôles.

■ De plus, la norme française expérimentale XP P 18-545 (Granulats – Éléments de définition, conformité et codification) d'application volontaire vient expliciter, préciser et compléter ce dispositif normatif européen, pour tenir compte du niveau d'exigence requis par les techniques actuelles d'une part, et du tissu industriel existant d'autre part.

Elle regroupe ainsi plusieurs caractéristiques sous forme de codes, eux-mêmes définis à partir de catégories européennes.

Elle introduit aussi la possibilité, pour les gravillons, d'utiliser sous certaines conditions une règle de compensation (entre résistance à la fragmentation et résistance à l'usure) et des critères de régularité granulométrique (tolérances à d et D), indispensables aux pratiques françaises courantes. Elle permet enfin de maintenir deux notions employées en France depuis de nombreuses années mais qui n'ont pas encore été reprises à l'échelon européen, à savoir les critères de conformité et d'acceptation et la fiche technique produit ou FTP, laquelle synthétise les valeurs spécifiées des caractéristiques normalisées du produit, que le producteur s'engage à respecter, et les résultats des essais les plus récents effectués par le producteur sur ce même produit.

Il existe en outre une marque NF granulats, qui est une certification française de produits, volontaire, fondée sur l'application des normes françaises et européenne précédemment

évoquées, et dont le droit d'usage est accordé et renouvelé par Afaq-Afnor-Certification, après un audit initial d'inspection et des audits périodiques de surveillance.

Elle prouve que les granulats sont conformes à ces normes, que les valeurs spécifiées de leurs caractéristiques ont été vérifiées et validées par un organisme indépendant et qu'elles sont effectivement respectées de façon continue par le producteur, donc que ces produits sont aptes à être utilisés pour l'usage prévu. Même si elle accroît la confiance du maître d'ouvrage, elle ne le dispense pas de contrôler de tels granulats certifiés.

La qualité d'une fourniture de granulats, c'est non seulement le respect des exigences du marché, mais c'est avant tout l'homogénéité des caractéristiques contrôlées. Cette régularité constitue d'ailleurs l'une des clés de la réussite du chantier.

Pour le maître d'ouvrage, tout cela implique de fixer des spécifications d'usage adaptées à ses propres besoins, d'utiliser des granulats répondant au mieux à ses critères de choix, et d'effectuer tous les contrôles nécessaires pour vérifier que les granulats sont conformes à son attente et ont en plus cette régularité tant recherchée.

3.9. Spécifications d'usage

- Domaine des chaussées

Les spécifications d'usage ont été fixées en fonction du trafic poids lourds, de la position de la couche considérée dans la structure de chaussée et de la technique routière utilisée pour sa réalisation (traitée ou non par un liant hydraulique ou hydrocarboné essentiellement).

Elles sont d'autant plus exigeantes que le trafic lourd est plus intense, que la couche est plus proche de la surface de la chaussée, que le liant est plus souple, que son dosage est plus faible et que son temps de prise est plus long, enfin que les propriétés mécaniques du produit routier employé sont plus faibles. Elles prennent aussi en compte une hétérogénéité possible des fournitures de granulats et un niveau courant d'aléas de chantier.

Ces spécifications d'usage ont été établies sur la base de résultats probants d'études en laboratoire et d'expérimentations sur chaussées, puis de bilans de comportement à long terme. Elles sont en outre confortées par l'expérience acquise grâce aux travaux de construction, de réhabilitation et d'entretien des routes et des autoroutes depuis plus de trente ans. Elles permettent de réaliser les chantiers dans de bonnes conditions et d'obtenir la qualité finale visée lorsque les exigences des marchés et des règles de l'art relatives à la fabrication et à la mise en œuvre des produits routiers, sont satisfaites.

Des spécifications d'usage pour les assises et les revêtements de chaussées sont suggérées dans la note d'information no 10 du Comité français pour les techniques routières (CFTR). Elles sont fondées sur les normes européennes et française granulats (§ 3) d'une part, et sont

calquées sur le standard existant pratiqué depuis maintenant plus de trois décennies d'autre part. L'objectif affiché est de guider les maîtres d'ouvrage dans leur choix. Rappelons que le CFTR regroupe des donneurs d'ordre et des professionnels, qui représentent l'ensemble de la communauté technique routière nationale de façon paritaire et partenariale.

Il résulte de tout cela que les spécifications d'usage conseillées pour les assises sont moins sévères que celles proposées pour les revêtements, lesquels nécessitent des granulats très résistants, concassés et peu polissables.

Par ailleurs, le recours à la règle de compensation entre les résistances à l'usure et à la fragmentation (cf. XP P 18-545) est généralement justifié par l'expérience technique régionale, avec le souci d'une utilisation rationnelle de la ressource sur le bassin susceptible d'alimenter le chantier, et la perspective d'une réduction des coûts de transport. De même, l'ajout de critères de régularité granulométrique est systématiquement motivé par la volonté de fabriquer et mettre en oeuvre des produits routiers de granularité constante.

- Assises

■ Pendant la phase de travaux, les diverses opérations de manutention, de stockage, de reprise, de fabrication et de mise en oeuvre, font subir aux granulats des frottements réciproques qui amènent une usure avec production de particules fines ; les granulats sont d'autant plus sensibles à cette attrition qu'ils sont plus anguleux, moins résistants et plus hétérogènes. Le compactage soumet en outre les granulats à des chocs répétés qui conduisent à une fragmentation avec formation d'éléments de toutes dimensions.

Après sa mise en service, la chaussée encaisse des sollicitations mécaniques dues en grande partie à la circulation des poids lourds ; les granulats évoluent alors différemment selon la technique routière mise en place.

Dans une assise non traitée par un liant hydrocarboné ou hydraulique, les granulats ne sont pas liés entre eux et subissent de ce fait, sous l'action agressive du trafic poids lourds, une fragmentation et une usure dans toute la masse de l'assise. Le phénomène d'attrition est d'autant plus important que la granularité du produit routier est plus creuse et sa compacité plus faible. L'attrition génère du sable et des fines, modifiant ainsi la granularité du produit routier ; cette évolution se fait toujours au détriment de la stabilité mécanique de l'assise, et peut aussi diminuer sa perméabilité.

L'emploi d'un liant hydrocarboné amène une liaison « souple », qui limite les mouvements relatifs des granulats mais ne les supprime pas.

Avec un liant hydraulique, après la prise, les granulats sont liés entre eux et ne se déplacent plus les uns par rapport aux autres.

Granulats, origines et caractéristiques

Cependant, la fissuration de l'assise traitée, due au retrait thermique, entraîne des frottements réciproques des granulats de part et d'autre des fissures, à chaque passage de poids lourds.

Elle favorise en outre l'infiltration de l'eau, ce qui accélère encore l'attrition.

■ La recherche d'économies dans les projets impose d'utiliser au mieux les matériaux disponibles localement, en ayant recours au besoin à des granulats encore mal connus donc peu employés dans les produits routiers parce que ne répondant pas forcément à des spécifications d'usage de maîtres d'ouvrage. Leur utilisation se justifie aussi par l'épuisement de certaines ressources classiques et par les exigences accrues en matière de protection de l'environnement.

De tels granulats non traditionnels ne peuvent cependant être utilisés que si des résultats d'études et d'expérimentations préalables permettent d'évaluer les risques encourus avec précision.

De plus, leur emploi ne doit en aucun cas se traduire par un abaissement quelconque de la qualité finale des assises ; en d'autres termes, cette qualité finale doit impérativement être la même quel que soit le niveau de performance des granulats entrant dans la composition des produits routiers. L'utilisation de ces granulats non traditionnels implique par ailleurs une parfaite maîtrise de leur homogénéité ainsi qu'une bonne connaissance de leurs limites et précautions d'emploi. Elle nécessite aussi la mise au point de méthodes spécifiques adaptées à leurs caractéristiques géotechniques, en jouant par exemple sur les propriétés mécaniques des produits routiers et sur le dimensionnement des assises voire des structures de chaussées. Elle impose enfin des conditions particulières de chantier et des sujétions supplémentaires de mise en œuvre, qui permettent d'obtenir la qualité finale visée et de réduire au maximum les risques encourus.

Le CFTR a mis en place une méthodologie de valorisation et de promotion d'un granulat non traditionnel local. Elle consiste à identifier le facteur de risque, à évaluer ce risque par des expérimentations sur chaussées suivies dans le temps, puis à diffuser les résultats obtenus sous forme de guide technique régional. Ce guide doit renseigner principalement sur les caractéristiques géotechniques du granulat en question, ses utilisations possibles, ainsi que sur les conditions, limites et précautions particulières d'emploi.

Le fait que ces éléments d'information aient été déduits de tests en vraie grandeur incite à penser que les risques encourus sont maîtrisables dès lors que la procédure qualité est strictement appliquée.

L'initiative de la démarche et l'élaboration du guide sont du ressort des parties prenantes de l'échelon local concerné, le CFTR validant le projet avant sa publication ; cette validation

consiste à vérifier la méthode appliquée, le contenu du document, ainsi que la fiabilité et la cohérence des préconisations par rapport au référentiel technique retenu. Il existe aujourd'hui plusieurs guides techniques régionaux de ce type ; des assises ont même été réalisées dès leur parution, conformément à leurs recommandations pratiques.

Mais il ne faut pas oublier que plus on assouplit une spécification d'usage, plus on se rapproche du seuil limite qu'il est impératif de ne jamais franchir, et par conséquent, plus la caractéristique contrôlée doit être homogène et plus la surveillance doit être renforcée ; c'est un peu « l'histoire de la tentation marginale vers la réalité scientifique ».

-Revêtements

Les granulats pour couche de roulement doivent remplir trois fonctions :

— rester dans le produit routier que l'on a choisi de mettre en place ; c'est le rôle de la granularité, de la forme, de l'angularité et de la propreté vis-à-vis notamment de la stabilité immédiate ; c'est aussi le problème de l'adhésivité avec le liant vis-à-vis principalement de la tenue dans le temps ;

— se maintenir dans leur intégrité là où ils sont, donc conserver toutes leurs propriétés aussi longtemps que possible ; c'est le rôle essentiel de la résistance mécanique exprimée en termes de résistance à la fragmentation et de résistance à l'usure ;

— assurer de bonnes caractéristiques antidérapantes, ce qui fait intervenir la granularité, la forme et l'angularité, pour la macrotexture de la surface routière d'une part, et la résistance au polissage pour la microtexture de celle-ci d'autre part, la résistance au polissage étant liée aux aspérités de surface des gravillons ou microrugosité.

Si la granularité et la forme des granulats, la formule et la mise en oeuvre du revêtement influencent l'obtention d'une surface initiale antidérapante, la résistance mécanique, l'angularité et la microrugosité jouent un rôle important dans son évolution sous l'action du trafic poids lourds. La fragmentation maintient l'angularité et la microrugosité mais fait disparaître rapidement les gravillons.

L'usure diminue progressivement l'angularité et augmente les surfaces susceptibles de se polir. Il faut donc trouver des gravillons et des conditions d'utilisation pour lesquels la fragmentation et l'usure soient réduites au maximum et pour lesquels le poli ne puisse se développer.

Plus une roche contient de minéraux durs, plus elle est difficile à polir ; seuls les minéraux tendres atteignent un bon poli. Il en résulte que les roches riches en calcite se polissent très vite, les roches riches en feldspaths moyennement vite et les roches riches en quartz pratiquement pas, abstraction faite de leur structure.

Granulats, origines et caractéristiques

Lorsqu'une roche contient des minéraux de duretés différentes, il y a toujours une usure différentielle laissant les plus durs en relief et les plus tendres en creux. On obtient alors une microrugosité limite qui n'est jamais un bon poli. La roche idéale serait composée pour moitié de minéraux durs et pour moitié de minéraux tendres.

Il existe cependant une contradiction entre résistance au polissage et résistance mécanique, l'une s'obtenant toujours au détriment de l'autre : c'est la présence de minéraux tendres parmi des minéraux durs qui favorise une bonne résistance au polissage, mais fait alors chuter fortement la résistance mécanique.

De même, lorsque la porosité d'une roche croît, sa résistance au polissage augmente mais sa résistance mécanique diminue.

Les roches ayant simultanément d'excellentes résistances à la fragmentation, à l'usure et au polissage sont rares : la résistance à la fragmentation des quartzites, la résistance à l'usure des microdiorites et la résistance au polissage des basaltes ne sont pas toujours très bonnes. De façon générale, on constate qu'une structure fine et une porosité faible confèrent une résistance mécanique forte. Mais pour les roches à résistance mécanique élevée et à faible contraste de dureté des minéraux, on arrive fréquemment à un mauvais état de poli final.

- Domaine des bétons

Pour les bétons de chaussées, des spécifications d'usage figurent aussi dans la note d'information no 10 du CFTR, à titre de suggestion.

Pour les bétons destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil, c'est à l'acquéreur de granulats qu'il appartient de définir ces spécifications d'usage dans son cahier des charges, en fonction du type de construction, de la qualité du béton et de divers risques d'exposition. Pour ce faire, il utilise les prescriptions de la norme française XP P 18-545, laquelle s'appuie sur la norme européenne NF EN 12620.

Là encore, l'homogénéité des caractéristiques des granulats est essentielle, et en particulier la régularité de la granularité des sables.

De plus, si l'angularité des granulats ne conditionne qu'assez faiblement et indirectement la résistance du béton durci, en revanche elle a une très forte influence sur la maniabilité du béton frais, ce qui incite les entreprises de mise en oeuvre à utiliser préférentiellement des granulats alluvionnaires roulés, aux formes arrondies. Il n'en demeure pas moins vrai que dans les régions pauvres en matériaux alluvionnaires, on sait formuler des bétons à base de granulats concassés, anguleux donc à arêtes vives, moyennant notamment l'incorporation d'additifs voire d'adjuvants particuliers.

Par ailleurs, certains minéraux peuvent dégrader les bétons :

Granulats, origines et caractéristiques

- les variétés amorphes de la silice (opale, calcédoine) et les phases vitreuses siliceuses, peuvent générer des désordres dus à l'alcali-réaction avec les alcalins du ciment ;
- le gypse et la pyrite sont susceptibles de produire des réactions sulfatiques ;
- les argiles sont parfois responsables de gonflements par réaction avec d'autres éléments ;
- la présence d'oxydes de fer et l'oxydation de pyrites tendent à développer des taches de rouille sur les parements.

En outre, l'utilisation de silex, dans une gamme de teneurs pessimales, peut occasionner des désordres dus à l'alcali-réaction. Enfin, la subsistance de plâtre dans les matériaux de démolition est susceptible de générer des gonflements par réaction avec d'autres éléments.

3.10 - Conclusion

Les granulats représentent, en poids et en volume, la part la plus importante des bétons hydrauliques et des produits routiers.

De par ce fait, c'est assez largement à eux qu'il incombe d'assumer les performances mécaniques de ces matériaux de construction, sans perdre de vue le rôle essentiel du liant qui est de les maintenir en place.

Les caractéristiques des granulats dépendent de la nature et de la qualité du matériau d'origine d'une part, et de leurs conditions d'exploitation et d'élaboration d'autre part.

Les propriétés géométriques et de propreté peuvent être considérablement améliorées en mettant en œuvre des méthodes d'extraction, de fragmentation et de classement appropriées, alors que les propriétés intrinsèques ne peuvent être que peu influencées par la fabrication. L'homogénéité de toutes ces caractéristiques, c'est-à-dire la régularité des fournitures de granulats, constitue l'objectif prioritaire que tout producteur doit viser et que tout maître d'ouvrage doit vérifier.

L'évocation de l'origine d'une ressource ne suffit pas à en définir les usages. Au sein d'une famille, les caractéristiques géotechniques peuvent en effet être très différentes.

De même qu'autrefois, les hommes sélectionnaient les matériaux les plus aptes à la réalisation des ouvrages, en ayant recours aux règles de l'art de leur époque (« le sable doit crisser dans la main », « le pavé doit rendre un son clair au marteau »), aujourd'hui, les ingénieurs imposent des exigences contraignantes aux granulats, portant sur des propriétés très diverses fonction du type d'emploi, et fondées sur des essais conventionnels normalisés.

Les spécifications d'usage actuelles tendent généralement à concilier le souhaitable et le possible, les impératifs techniques et les contraintes économiques, dans le cadre d'une gestion optimale des ressources existantes et potentielles au mieux des intérêts de la collectivité, et dans un souci de développement durable.

4-CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISEES ET LES METHODES D'ESSAIS

4-1 Introduction :

Ce chapitre présente à la fois les matériaux que nous utiliserons, et les méthodes qui seront mises en œuvre dans la suite de ce travail, après on exposera les caractéristiques chimiques et minéralogique de ces matériaux puis le plan expérimental de notre étude.

L'objectif de ce travail est d'évaluer expérimentalement l'effet des différents minéraux des granulats de la région de Biskra sur la qualité du béton, qu'il soit frais ou durci, nous avons choisi de varier les différents constituants de béton tels que le dosage en ciment et le dosage en eau et d'utiliser 3 types de gravier.

4-2 Ciment résistant aux sulfates CRS :

- DEFINITION

Le Ciment CRS (ciment résistant aux sulfates) est constitué de :

- 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%) peuvent être incorporés dans ce ciment ;
- Du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES ET MINERALOGIQUES

- La proportion de la magnésie (**MgO**) dans le ciment est inférieure ou égale à **5 %**.
- La teneur en sulfates (**SO3**) est inférieure ou égale à **3,5 %**.
- La perte au feu est inférieure ou égale à **4%**
- Le résidu insoluble est inférieur ou égal à **3%**
- La teneur en C3S est inférieure ou égale à **50%**
- La teneur en C3A est inférieure ou égale à **5%**
- La somme de (C4AF+2C3A) est inférieure ou égale à **22%**

CARACTERISTIQUES PHYSICOMECHANIQUES

- Expansion à chaud inférieur 10 mm sur pate
- Surface spécifique de Blaine 3200 cm²/g ±250 normes
- Résistance à la compression à :
 - 07 Jours 315 Kgf/cm²
 - 28 jours 400 Kgf/cm²
- Temps de prise en minutes
 - Début : 1h30 min
 - Fin (mesuré) 4h20 min

EMPLOIS HABITUELS

- ✓ Il est utilisé comme ciment de base pour les travaux de génie civil en milieu agressif.
- ✓ Il est utilisé dans les travaux de béton nécessitant une faible chaleur d'hydratation.

- Propriétés physiques

➤ La finesse

L'étude de la finesse de mouture, pour les liants est indispensable puisqu'il influe considérablement sur la résistance mécanique, la maniabilité...etc. La finesse d'un ciment peut être caractérisée par sa **surface massique** : c'est la surface totale des grains contenus dans une unité de masse exprimée en m² / kg de poudre ou (cm²/g).

Elle est calculée en fonction du temps au moyen de l'appareil appelé « perméabilimètre de Blaine » (EN 196-6) [31]

La surface massique :

$$S = C_{app} \times C_d \times C_t \times \sqrt{T}$$

Avec ; $C_{app} = 0.255$ (la constante de l'appareil)

C_d : la constante de la masse volumique absolue de ciment

C_t : la constante de la température de l'air ambiant.

➤ La consistance normale

Le but de l'essai de consistance est précisément de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage. La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement, dans la pâte d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « consistance Vicat ». (EN 196 – 3) [32]

➤ **Le temps de prise**

Le début ou la fin de prise dépend de plusieurs paramètres, il varie notamment suivant la composition chimique et la finesse de mouture de ciment étudié, il dépend aussi de la température ambiante et, le cas échéant, des dosages en adjuvant, utilisés à une même température et sans adjuvant, deux ciments différents pourront se distinguer, par une plus ou moins grande rapidité de prise.

L'objectif de l'essai est de définir, pour un ciment donné, un temps qui soit signification de cette rapidité de prise. (EN196 – 3) [32].

Le **tableau 4-1** résume les résultats des différents essais physiques sur le ciment

Tableau 4-1 : Essais physiques sur le ciment .

Essais	Finesse Cm ² /g	Consistance normale (%)	Début de prise (heure : min)	Fin de prise (heure : min)
Résultats	4050	27	2 :40	3 :45

- Essai mécaniques sur le ciment :

▪ **Mesure des résistances à la compression et à la traction**

Les ciments sont classés d'après leur résistance mécanique minimale, à la rupture par compression à 7 et 28 jours d'âge, mesurée sur des éprouvettes (4x4x16 cm) en mortier normale (EN 196-1) [33].

Un mortier normal contiendra, en poids : 1partie de ciment (CPJ 42.5), 3parties de sable normal 0.45 partie d'eau. (Mc = 500g, Ms =1500g, Me = 225g), (E/C = 0.45).

Les résultats des essais de résistance figurent dans le **tableau 4-2**.

Tableau 4-2 : Résistance à la traction et à la compression du ciment .

Jours	Résistances en (MPa)	
	à la traction Rt	A la compression Rc
2	3.1	19.3
7	5.2	33.5
28	6.5	45.7

- En ce qui nous concerne donc, l'activité du ciment CRS 42.5 MPA est vérifiée.

4.3 - Les granulats

Lors de l'élaboration de ce projet, on a choisi trois sources de matériaux (granulats) de la région de Biskra et le sable d'El Oued.

Pour les besoins de ce projet, on a jugé important d'utiliser :

- Pour les graviers :
 - Gravier de la carrière d'Ain-Touta
 - Gravier de la carrière d'El-Hadjeb
 - Gravier de la carrière de Ziani

- Gravier de la carrière de Ziani:

Les roches de calcaires sont utilisées pour différents usages : agrégats, béton armé, construction des routes, ballasts.....Le front de taille du gisement de la carrière de Ziani el outaya Biskra est constitué des calcaires du crétacé supérieure (turonien, sénonien) constituant puissant, amas indépendants. Ils sont largement développés à l'ouest de la wilaya. Implantation de la carrière à cet endroit obéi aux bonnes conditions géographiques, économiques et minières. Les calcaires du turonien sont chimiquement purs.

- Gravier de la carrière d Aïn-Touta :

Le gisement de la carrière d'Ain-Touta du point de vue stratigraphique fait partie du complexe sédimentaire carbonate du turonien, le faciès est représenté par des bancs de calcaires massifs et compacts de couleur grise et des marnes et marno- calcaires la stratigraphie du gisement de calcaire d'Ain-Touta est constitué du sommet vers la base par :

- des marnes de couleur grise à gris foncé schisteuse et friable renfermant des intercalations de niveaux calcaires, la puissance de cette série de calcaire est d'environ 23m.

- des calcaires de couleur grise à gris brunâtre et beige à la patine et gris fonce a sombre a la cassure, les bancs sont massifs et d'ordre métrique (1.5a2m), la puissance de cette série de calcaire est d'environ 40 m.

- Gravier de la carrière d El-Hadjeb:

La région d'El-Hadjeb se situe dans une plaine saharienne constituée par des formations sédimentaire appartenant au quaternaire moyen, ces formations sont représentées par des alluvions sableuses et peu argileuses et gypseuses.

Dans l'atlas saharien, l'affleurement en position stratigraphique anormale, il représente les pointement deapriques constitués d'argiles bariolées, gypses et dolomies noires et rubanées et de conglomérats riches en quartz, cette région est constituée essentiellement de calcaire turonien composée d'une forte minéralisation riche en carbonate de calcium CaCO_3 .

- Pour le sable :
 - Sable naturel (SN) 0/5 provenant de Oued-Lioua (Biskra).

4.3.1-Granulométrie et forme des grains

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme NF EN 933-1[34], qui permet de déterminer la grosseur et les pourcentages de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension inférieure ou égale à 80 mm, en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas, le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Les courbes granulométriques des gros et fins granulats utilisés sont représentées dans les figures 3-1 à 3-4. On remarque que la granulométrie des trois types de gravier étudiés est admissible, située à l'intérieur du fuseau granulaire.

Le module de finesse de sable naturel utilisé est de **2.64** qui est acceptable pour la confection d'un béton hydraulique.

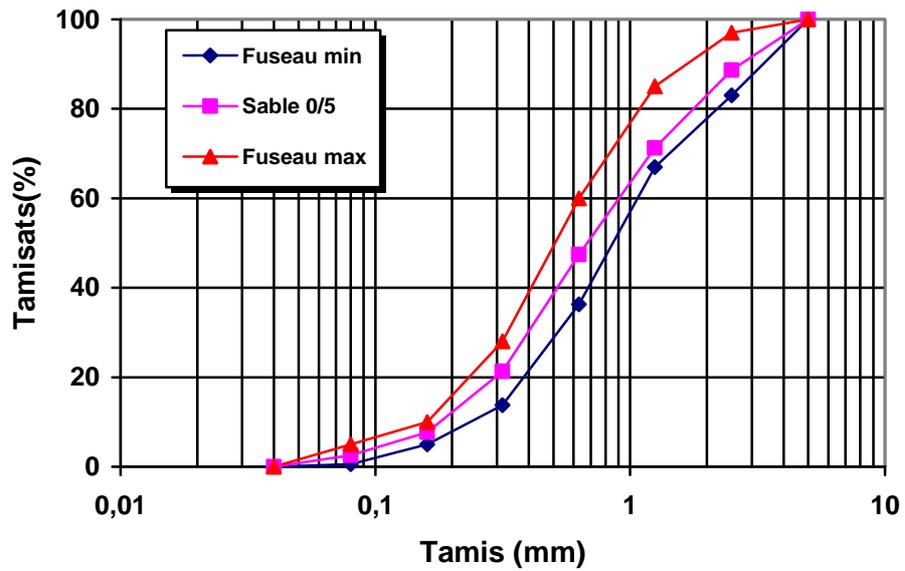


Figure 4.1 Courbe granulométrique du sable

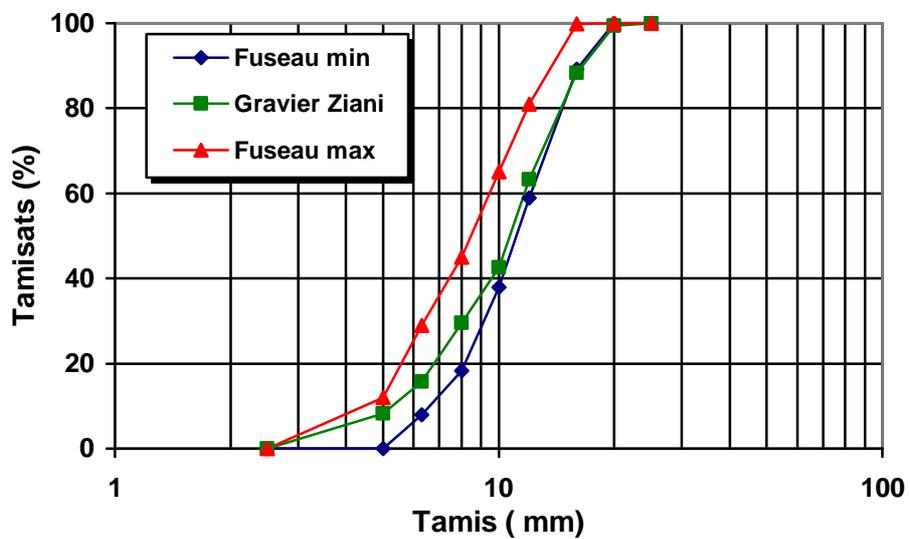


Figure 4.2 Courbe granulométrique du gravier de ziani

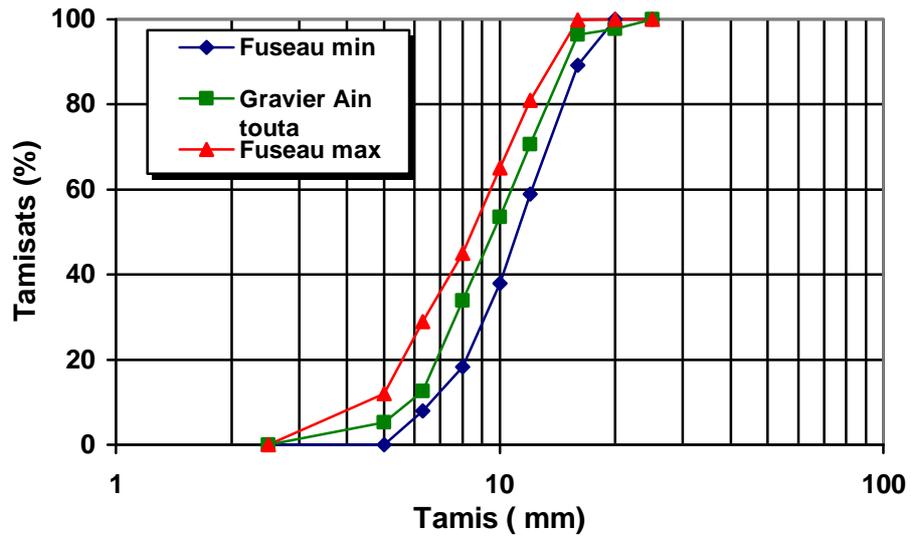


Figure 4.3 Courbe granulométrique du gravier de Ain Touta

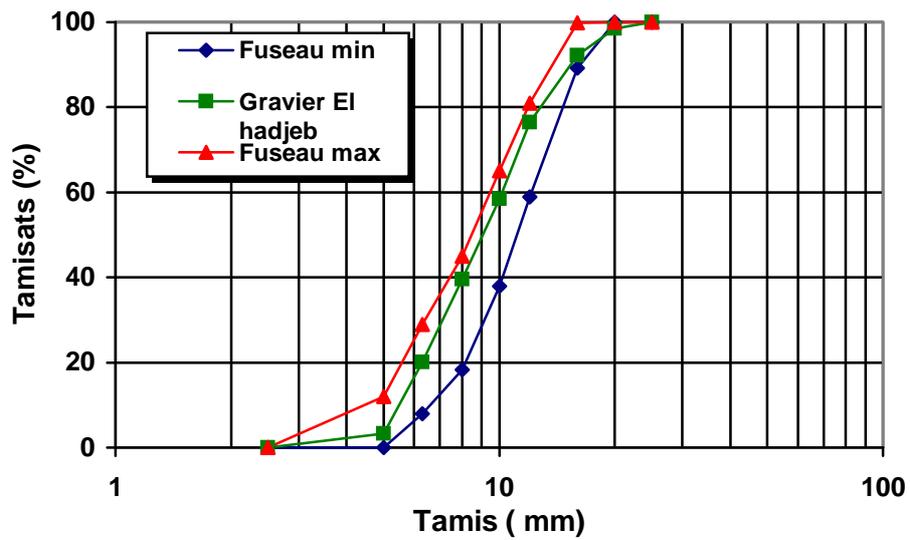


Figure 4.4 Courbe granulométrique du gravier de El Hadjeb

4.3.2- Masses volumiques

Les masses volumiques apparentes et absolues des différents granulats étudiés sont mesurées d'après la norme NF P 18-554 et 555 [35], les résultats sont résumés dans le **tableau 4-3**.

Tableau 4-3 : Masses volumiques des granulats étudiés

	G ziani	G Ain Touta	G El Hadjeb	SN
Masse volumique apparente (kg/m³)	1410	1380	1360	1600
Masse volumique absolue (kg/m³)	2610	2710	2570	2650

4.3.3 -Absorption d'eau

On détermine un coefficient d'absorption qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion pendant 24 heures à 22° C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme NF P 18-555 [35].

Les résultats de cet essai sur les granulats étudiés sont portés **au tableau 4-4**.

Tableau 4-4 : Les résultats d' absorption d'eau pour les granulats étudiés.

Granulats	G ziani	G Ain Touta	G El Hadjeb	SN
Abs %	1	0.48	1.02	12

4.3.4-Propreté des granulats

- **Propreté des gros agrégats (impureté)**

Les impuretés concernées sont telles que le limon, l'argile, et des matériaux solubles et non pas comme les morceaux de bois, le gypse qui sont absolument proscrites pour un béton de qualité. Le pourcentage prescrit par la norme NF P 18-591 [36] à ne pas dépasser est fixé à 3%. Les résultats obtenus sont représentés dans le **tableau 4 -5**.

Tableau 4 -5 : pourcentages d'impureté des gros granulats utilisés

Types de granulat	G ziani	G Ain Touta	G El Hadjeb
Impureté %	0.12	0.4	0.6

4.3.5 Résistance à l'abrasion (Los – Angeles)

La dureté des granulats utilisés a été contrôlée par l'essai de Los- Angeles conformément à la norme NF P 18-573 [37] qui exige la valeur limite de 40% à ne pas dépasser. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4-6.

Tableau 4-6 : Résultats de Los –Angeles

	G ziani	G Ain Touta	G El Hadjeb
Los Angeles (%)	21.78	22.10	27.04

4.3.6 -Equivalent de sable

Cet essai, utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sable des éléments sableux plus grossiers, conformément à la norme (NF P18 – 598) [38]

Les résultats de l'essai sur le sable étudié figurent **au tableau 4-7**.

Tableau 4 -7 : résultats d'équivalent de sable

Type de sable	ESV%	ES%	Nature et qualité du sable
Sable 0/5 « lioua »	70.24	67.76	Sable légèrement argileux, de propriétés admissibles pour béton [10].

4.3.7-Compacité et porosité des granulats

La compacité est définie par le rapport du volume de matière pleine au volume total. Alors que la porosité (P) est par définition le complément à l'unité de la compacité.

« $P = 1 - C$ ». L'essai est réalisé selon la norme NFP18-554 [35].

Les résultats obtenus sont présentés dans le **tableau 4-8**.

Tableau 4-8 : Compacité et porosité des granulats.

	Gravier			Sable
	G ziani	G Ain Touta	G El Hadjeb	SN
Compacité (%) $C = \frac{MV_{App}}{MV_{Ab}}$	54	51	52	60
Porosité (%) $P = 1 - C$	46	49	48	40

MV_{App} : Masse volumique apparente.

MV_{Ab} : Masse volumique absolue.

On constate que la compacité du gravier de ziani est plus élevée que celle des deux autres Ain touta et El Hadjeb qui sont presque identique.

4.3.8-Analyse chimique des granulats utilisés

Il est évident d'analyser les granulats utilisés dans le but de savoir le taux des matières nuisibles qui peuvent affecter la qualité de béton, les résultats des analyses chimiques ont été pris du rapport géologique de chaque zone.

Le tableau 4-9 résume la composition chimique des différents granulats utilisés

Tableau 4-9 : Analyse chimique des granulats utilisés.

Résultats exprimés en %.[46]et[47]

Composantes	G ziani	G Ain Touta	G El Hadjeb
SiO ₂	0.01-0.02	0.84-0.92	0.02-0.04
AL ₂ O ₃	-	0.3-4.87	-
Fe ₂ O ₃	0.15-.030	0.72	0.10-0.20
CaO	54.6-55.44	45.42-54.30	58.6-55.44
MgO	0.2-0.6	2.52	0.4-0.6
SO ₃	0.11-0.12	1.10	0.12-0.13
K ₂ O	0.03	0.02-0.7	0.02
Na ₂ O	0.06-0.07	0.04-0.20	0.05-0.06

4.4- Eau de gâchage

L'eau utilisée lors de la fabrication des mélanges de béton est celle provenant du robinet exempt d'impuretés. Il s'agit d'une eau potable. Sa température n'est pas contrôlée lors des gâchées, quoique le béton obtenu a une température assez constante d'un mélange à l'autre, de 18 à 20°.

4.5- Superplastifiant

Un superplastifiant a été utilisé dans trois mélanges, et ce dans des proportions variables. Il a été incorporé directement dans le mélange après quelques minutes de malaxage, selon la norme NFP18-335 [39]. Le superplastifiant en question est le **PLASTACRYL 85 (Granitex)**, un adjuvant qui est, lui aussi, utilisé fréquemment dans la pratique. Ce produit sert à augmenter la maniabilité des mélanges, et ce sans changer le rapport eau/ciment. Ses caractéristiques sont les suivantes :

Forme.....Liquide
 Couleur.....Ocre clair
 PH.....6 - 6,5
 Densité.....1,05 ± 0,01
 Teneur en chlorure.....< 1g /l

4.6- Poudre de carrelage

Afin d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques du béton, la Poudre de carrelage a été incorporée avec le ciment dans le malaxeur et ce dans trois mélanges de béton avec une proportion en masse de ciment de 8% et 15% et notamment en présence du superplastifiant. la Poudre de carrelage utilisée est dont les caractéristiques sont :

FormePoudre
Couleur.....Blanche
Masse volumique apparente.....0.5

4.7-La composition du béton

Dans le cadre de cette étude, en utilise deux méthodes de formulation de béton (**la méthode B.Scramtaïv ET Dreux Gorisse**) avec cinq dosages de ciment (250;300;350;400;500) kg/m³ conçus avec trois types de granulats, Ces trois types de granulats sont: le gravier de Ziani, le gravier d 'Ain touta et le gravier d' El hadjeb et aussi avec deux affaissements fermes et plastiques.

Notre étude est divisée en trois phases :

La première phase: la résistance a la compression

Dans La première phase la formulation de béton se fait ainsi :

- Utilisation de cinq dosages de ciment (250;300;350;400;500) kg/m³ avec les trois types de granulats sans adjuvant .
- Utilisation de cinq dosages de ciment (250;300;350;400;500) kg/m³ avec les trois types de granulats et avec trois pourcentages d adjuvant (0.05-0.25 et 0.5) %.
- Utilisation de cinq dosages de ciment (250;300;350;400;500) kg/m³ avec les trois types de granulats et avec deux pourcentages d'ajout de Poudre de carrelage (8 et 15) %.

La deuxième phase: traction par fondage

Dans La deuxième phase la formulation de béton se fait ainsi :

Utilisation d'un dosage de ciment (350) kg/m³ avec les trois types de granulats et avec trois compositions de béton(sans adjuvant ; avec adjuvant ; adjuvant + ajout)₂

La troisième phase: flexion

Dans La troisième phase la formulation de béton se fait ainsi :

Utilisation d'un dosage de ciment (350) kg/m³ avec les trois types de granulats et avec trois compositions de béton(sans adjuvant ; avec adjuvant ; adjuvant + ajout)₂

Les mélanges de béton ont été réalisés avec un rapport Eau/ Ciment variable tout en contrôlant la plasticité du béton, ferme et plastique qui définit la classe de béton indiquée par la norme NF P 18-305. La quantité de ciment utilisée pour tous les mélanges varie de 250 , 300 , 350 ; 400 et 500 kg par m³. Ces dosages en ciment ont été choisis à des fins de comparaison de l'effet de ciment sur la résistance surtout du béton à base des différents granulats. Il a fallu recourir à un super plastifiant pour certains mélanges, et à l'ajout de la Poudre de carrelage, afin d'obtenir des mélanges avec un affaissement convenable, ainsi que d'améliorer la résistance de ces derniers.

4.8- Confection et cure des éprouvettes

Des moules cubiques (10x10x10) cm³ ont été réalisés pour les essais de compression et d'absorption d'eau par immersion, des prismes (10x10x40) cm³ pour les essais de déformabilité et les essais de flexion simple et des cylindres (16x32) cm² pour l'essai de traction par fendage et l'essai de perméabilité. La confection des éprouvettes est faite conformément aux normes NF P 18-404 (déc. 1981) [40]. La conservation des éprouvettes couvertes par du plastique a été faite à l'air pendant 24h ensuite, après démoulage elles sont conservées dans l'eau à 20°C.

4.9- Programme des essais

4.9.1- Ouvrabilité

L'ouvrabilité a été mesurée par le Slump-test, conformément à la norme NF P 18-451 (déc.1981) [41]. Tous les bétons ont été fabriqués à ouvrabilités fermes et plastiques ce qui permet de faire une comparaison entre eux.



Photo 4-1 : Essai du Slump-test.

4.9.2-Essai de la résistance à la compression

Cet essai a été effectué sur une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et cela conformément à la norme NF P 18- 406 [42] .

Pour les différents mélanges de béton, trois cubes de (10x10x10) cm³ par échéance ont été utilisés pour effectuer l'essai, soit après 7, 28, 90 jours.



Photo 4-2 : Eprouvettes cubiques (10x10x10) cm³.

4.9.3-Essai de résistance à la traction par écrasement latéral (Brésilien)

L'essai Brésilien détermine la résistance à la traction par écrasement latéral des échantillons de béton. Cet essai a été effectué presque entièrement sur les bétons conventionnels, et ce pour la même raison décrite précédemment. Soit un bris mécanique de la première presse utilisée. Trois cylindres par échéance et par mélange ont été utilisés pour évaluer les différents mélanges. Les cylindres sont de dimension (16 x 32) cm², Cet essai est régi par la norme NF P18 – 408 [43].

La résistance de traction par fendage sera :

$$\sigma = \frac{2F}{\pi DL}$$

F : charge à la rupture

D : diamètre de l'éprouvette

L : hauteur de l'éprouvette

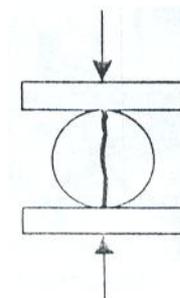




Photo 4-3 : Eprouvettes cylindriques (16x32) cm².

4.9.4 -Essai de traction par flexion

L'essai a été effectué selon la norme NF P 18 – 407 (déc1981) [44]. Les échantillons testés sont des prismes (10 x10 x40) cm³ après un cure de 7 et 28 jours dans l'eau à 22 °C. On a pris la moyenne de trois échantillons pour chaque type de béton. Cet essai consistait à rompre en flexion un échantillon prismatique de côté (a) et de longueur (L = 4a) à l'aide d'une machine de flexion.

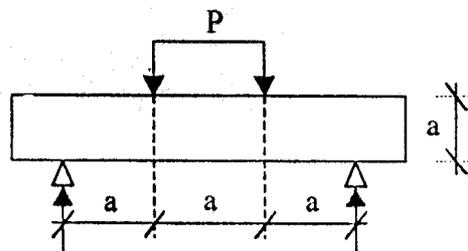


Photo 4-4 : Eprouvettes prismatiques (10x10x40) cm³.

4.9.5- Essai d'auscultation sonore (NF P 18-418). [45]

L'essai consiste à émettre une onde dans une éprouvette de béton et de mesurer le temps et la vitesse de cette onde en parcourant une distance connue, on peut déduire graphiquement la résistance à la compression du béton.

4.10 - Conclusion:

A fin de préparer un béton conçu à base des agrégats de la région de Biskra, nous avons mené un programme expérimental qui vise à caractériser ces matériaux vis-à-vis de ses propriétés physico-mécaniques et leur influence sur les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité des bétons.

L'influence du type des agrégats naturels par le temps de durcissement sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons a été également étudiée en détail.

5-ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

5-1 Introduction

Ce mémoire a pour but d'étudier le comportement des granulats et leur utilisation dans la confection du béton. Les travaux ont donc contribué à l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux et leur influence sur le comportement du béton.

L'étude de la technologie du béton amène à celle de la structure du mélange du béton et des facteurs déterminant la résistance et la durabilité du béton.

Les principaux paramètres de la structure sont :

Le rapport eau/ciment,

La qualité et la quantité du liant,

La qualité et la quantité des agrégats,

La qualité et la quantité de l'ajout.

Si la qualité primordiale recherchée est la résistance mécanique à la compression on devra rechercher un mélange compact, c'est à dire une haute compacité et une faible quantité d'eau de gâchage.

Si on recherche une bonne résistance à la traction, on devra en outre, s'assurer d'une bonne adhérence entre les liants et l'agrégat et d'un parfait enrobage.

Une qualité qui paraît avoir aussi une grande importance est l'étanchéité, c'est elle qui s'oppose au passage des fluides et à la corrosion des armatures.

Le comportement rhéologique et mécanique du béton est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, l'emploi judicieux de ses matériaux dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés ; physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques, et qui permet de faire un choix répondant à leur destination. Par ailleurs, il est essentiel que ces matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène à grande échelle et possédant par conséquent des propriétés uniformes. La principale difficulté est associée à la présence de l'eau dans les granulats. L'humidité des granulats doit être prise en compte lors des calculs de consigne des dosages. Une mauvaise connaissance de cette humidité perturbe à la fois la composition du squelette granulaire et le dosage total en eau. Ainsi, pour évaluer ces propriétés, on doit choisir des moyens adéquats afin de parvenir à une meilleure composition de béton.

Les granulas forment le matériau de remplissage inerte. Le terme «inerte» signifie que les granulas ne réagissent pas avec le liant et ne participent à la résistance du béton que par la compacité qu'ils confèrent à celui-ci. Cette idée de la participation des granulats, uniquement comme produit de remplissage, ne peut plus maintenant être admise telle quelle car il est prouvé

que: «tous les granulats sont réactifs. Ils diffèrent seulement par la nature des réactions auxquelles ils participent, par l'intensité et la vitesse de ces réactions et leurs effets» En terme de volume absolu, les granulats représentent 60 à 85% du volume du béton et sont, par conséquent, le constituant principal. Le type de granulats et le volume qu'ils occupent influencent considérablement les propriétés mécaniques du béton, son dosage et son coût.

Le choix des granulats destinés au béton est plus délicat qu'on pourrait le penser, d'autant plus que ces granulats doivent être aussi bon marché que possible. C'est-à-dire produits à la distance minimale du lieu d'utilisation. Pour qu'un granulat puisse être un bon constituant du béton, il faut donc:

qu'il soit convenable du point de vue pétrographique; qu'il joue bien son rôle de «produit de remplissage»: pour cela, ses caractéristiques géométriques définies dans le chapitre précédent doivent être appropriées à la destination du béton, ce qui implique des spécifications bien adaptées; il serait peu économique d'exiger systématiquement «le meilleur banc de la meilleure carrière»; enfin, une variabilité des caractéristiques constatées compatibles avec les spécifications, ce qui implique des équipements de production relativement perfectionnés.

Dans ce chapitre, on étudie trois types de granulats de la région de Biskra. (Gravier de Ziani, gravier d'El hadjeb et le gravier d'Ain touta).

Ce travail comprend cinq parties :

-1^{ère} partie : consiste à confectionner le Béton avec des éprouvettes (10×10×10) avec les trois graviers et utiliser cinq dosages de ciment HTS (250, 300, 350, 400 et 500) kg /m³ avec le sable de l'Oued et avec deux affaissements fermes (0÷4) cm et plastiques (5÷9) cm.

Aussi, on a utilisé deux méthodes de formulation de béton Skramtaev et Dreux Gorisse .

-2^{ème} partie : c'est de confectionner du béton avec un adjuvant avec différents pourcentages (0.05, 0.25 et 0.5) % toujours avec des éprouvettes (10×10×10) et les trois types de graviers et un dosage de 350 kg/m³, et la méthode de Skramtaev.

-3^{ème} partie : on suit les mêmes étapes de la 2^{ème} partie, sauf qu'on utilise ici un ajout de poudre de carrelage à la place de l'adjuvant.

Dans les trois premières parties, on vise la résistance à la compression.

-4^{ème} partie : on vise la résistance à la traction par fondage à l'aide d'éprouvettes (16×32) avec un dosage de 350 kg/cm³ et les trois types de graviers cités auparavant une composition avec adjuvant et une autre sans adjuvant et une 3^{ème} avec adjuvant + ajout.

-5^{ème} partie : ici, on vise la résistance à la flexion, et on suit les mêmes étapes que la 4^{ème} partie sauf que les éprouvettes dans ce cas sont (10×10×40) cm³

5-2 FORMULATION DU BETON AVEC LA METHODE DE SKRAMTAEV : [49]

5.2.1- Résistance à la compression :

Des figures (5-1) et (5-2), On constate qu'à l'âge de 7 jour la résistance à la compression augmente aux différents dosages de ciment, mais au 28^{ème} jour au 90^{ème} jour, on constate que la résistance à la compression au dosage 350 kg/m³ dépasse celle du dosage 400 kg/m³. Cela est due a la demande en eau de gâchage et due aussi au dépassement du rapport G/S optimum.

Tableau 5-1 Résistances à la compression des bétons à base des granulats de ziani pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement ferme (Formulation skramtaev)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	5.5	0.76	1.74	29	35	41
300 kg/m ³	5.3	0.63	1.76	40	48	55
350 kg/m ³	5	0.54	1.86	48	58	65
400 kg/m ³	4.5	0.48	1.9	50	55	60
500 kg/m ³	4	0.38	2.1	60	65	70

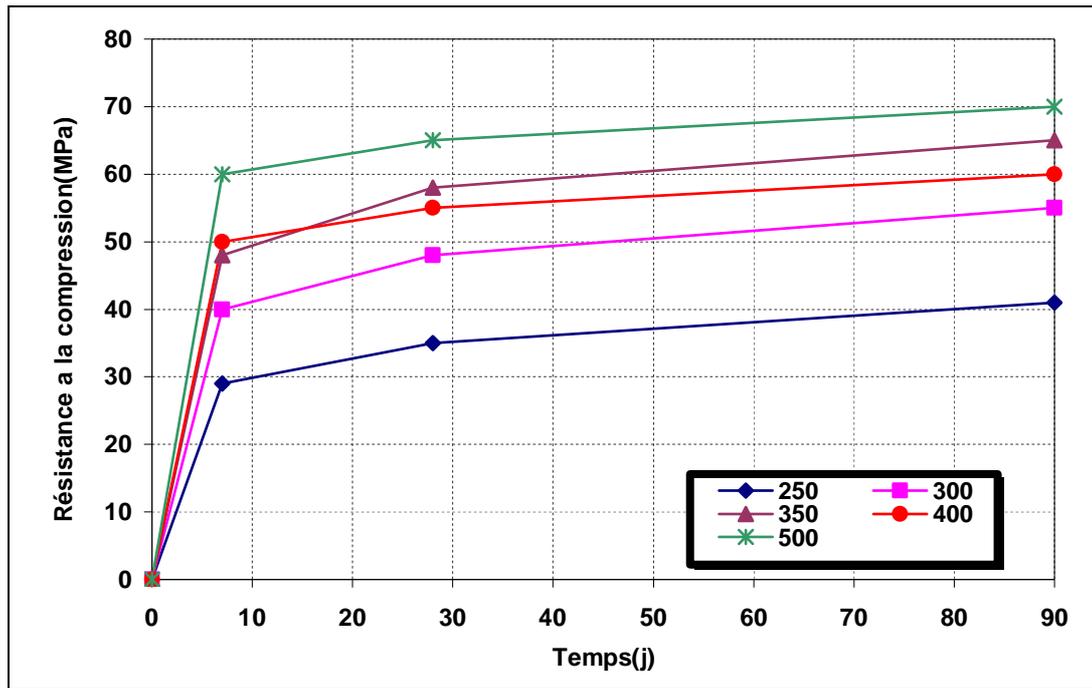


Figure 5.1 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

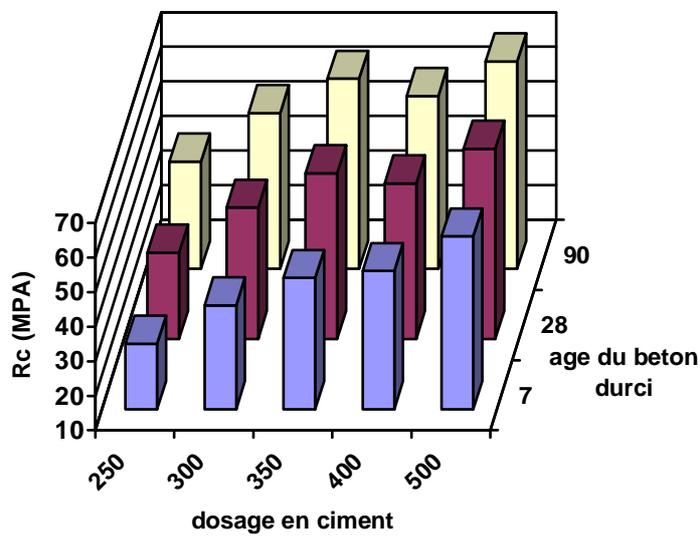


Figure 5.2 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

Analyse et discussion des résultats

Des figures (5-3) et (5-4), On constate qu'à l'âge de 90 jour la résistance à la compression augmente au différents dosages de ciment, mais au 7^{ème} jour au 28^{ème} jour, on constate que la résistance à la compression au dosage 350 kg/m³ et la même que celle du dosage 400 kg/m³. Cela est due à la demande en eau de gâchage et due aussi au dépassement du rapport G/S optimum.

Tableau 5-2 Résistances à la compression des bétons à base des granulats de ziani pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement plastique (Formulation skramtaev)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	7.1	0.85	1.77	28	38	44
300 kg/m ³	6.8	0.71	1.87	39	47	56
350 kg/m ³	6.4	0.61	1.97	43	50	59
400 kg/m ³	6	0.53	2.08	42	50	64
500 kg/m ³	5	0.43	2.26	50	57	70

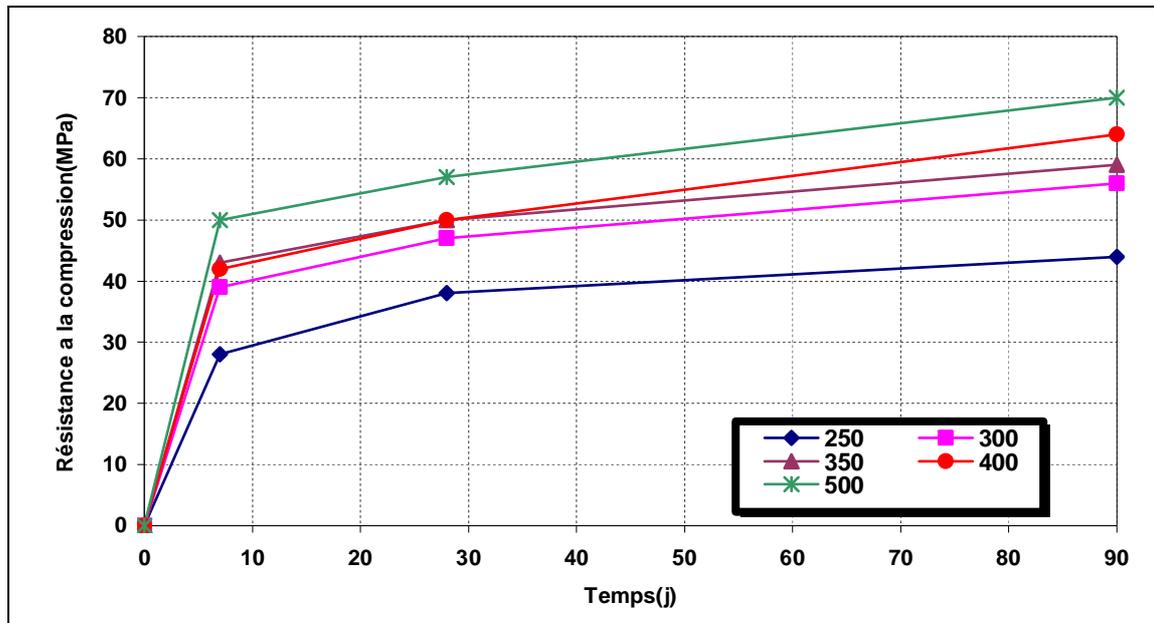


Figure 5.3 :L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

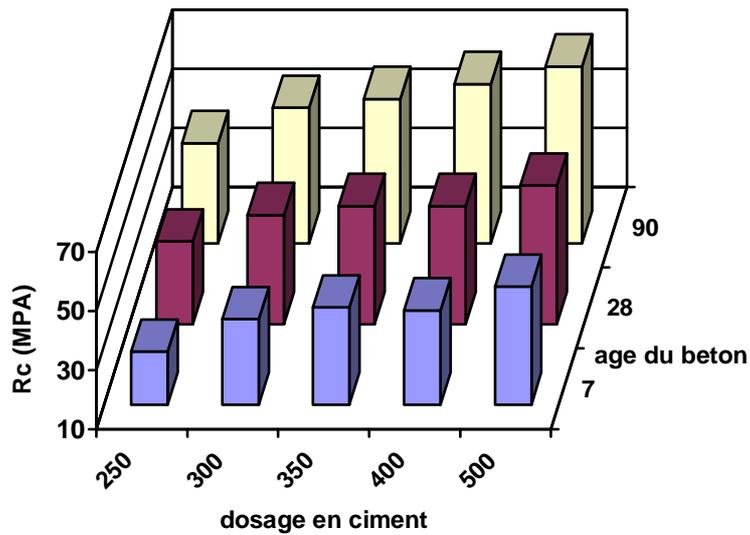


Figure 5.4:L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

Des figures (5-5) et (5-6), On constate qu'à l'âge de 7 jour la résistance à la compression augmente au différents dosages de ciment sauf au dosage de 400 kg/m³ la résistance chute , mais au 28^{eme} jour la résistance chute au dosage de 400 et 500 kg/m³ au 90^{eme} jour, on constate que la résistance à la compression augmente normalement .

Tableau 5-3 Résistances à la compression des bétons à base des granulats d Ain touta pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement ferme (Formulation skramtaev)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	5.3	0.76	1.74	35	42	48
300 kg/m ³	5.2	0.63	1.76	45	50	60
350 kg/m ³	4.5	0.54	1.86	46	56	64
400 kg/m ³	4	0.48	1.9	45	53	68
500 kg/m ³	3.5	0.38	2.1	50	58	68

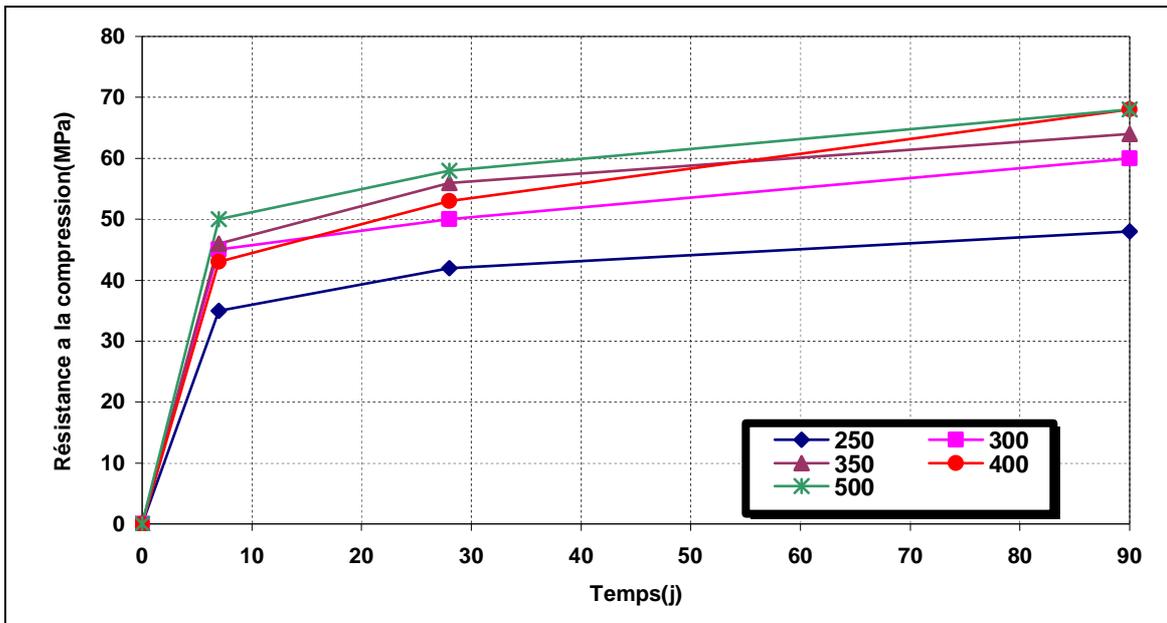


Figure 5.5 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

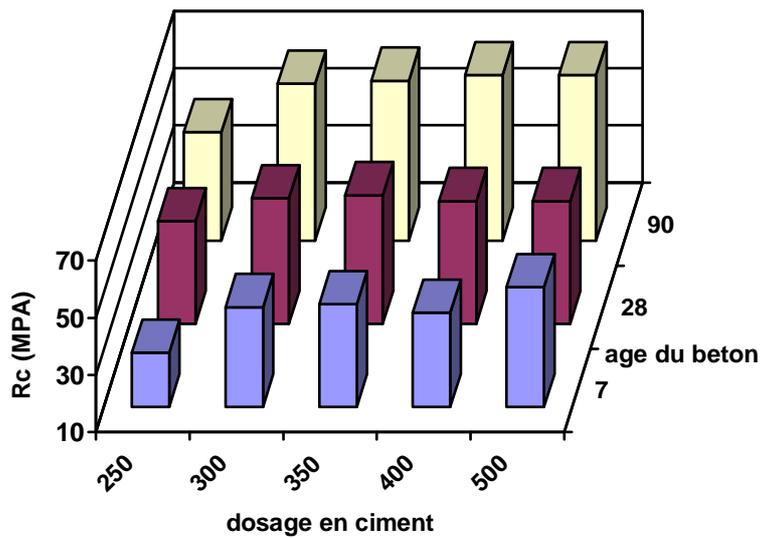


Figure 5.6 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

Des figures (5-7) et (5-8), On constate qu'à l'âge de 7 jour la résistance à la compression augmente au différents dosages de ciment, mais au 28^{ème} jour, on constate que la résistance à la compression au dosage 350 kg/m³ dépasse celle du dosage 400 kg/m³. tout cela est due à la demande en eau de gâchage et due aussi au dépassement du rapport G/S optimum.

Tableau 5-4 Résistances a la compression des bétons à base des granulats d Ain touta pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement plastique (Formulation skramtaev)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	6.8	0.85	1.77	28	35	41
300 kg/m ³	6.5	0.71	1.87	32	42	49
350 kg/m ³	6	0.61	1.97	43	50	58
400 kg/m ³	5.7	0.53	2.08	40	45	60
500 kg/m ³	5.5	0.43	2.26	50	57	62

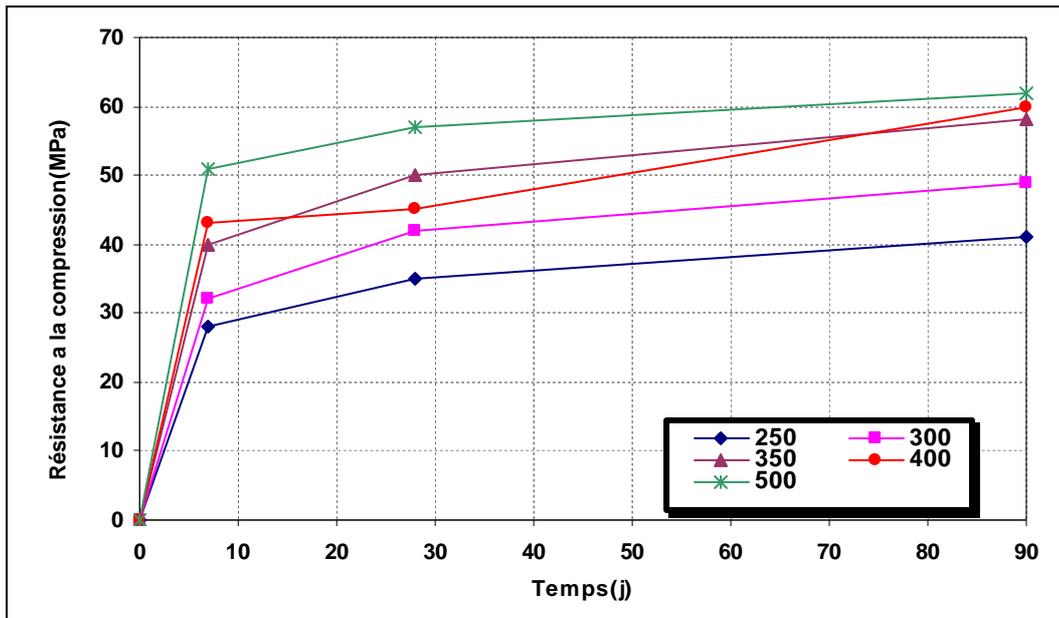


Figure 5.7 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

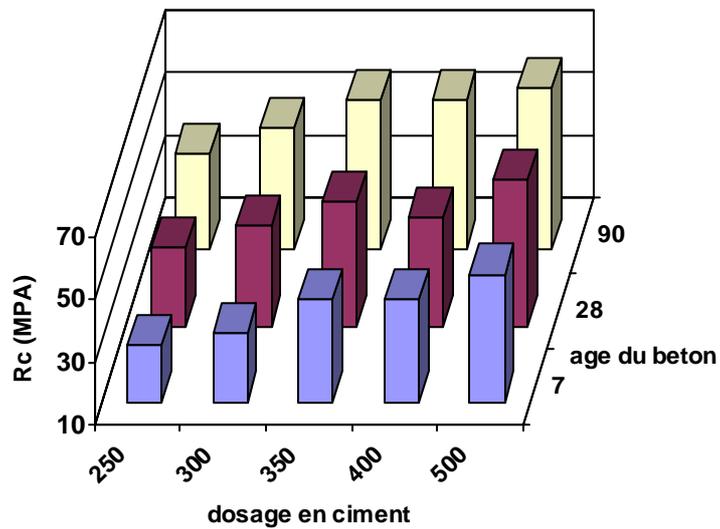


Figure 5.8: L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

Des figures (5-9) et (5-10) On constate qu'à l'âge de 90^{ème} jour la résistance à la compression augmente au différents dosages de ciment, mais au 7 jour au 28^{ème} jour, on constate que la résistance à la compression au dosage 350 kg/m³ dépasse celle du dosage 400 kg/m³ .

Tableau 5-5 Résistances à la compression des bétons à base des granulats d el hadjeb pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement ferme (Formulation skramtaev)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	5.8	0.76	1.74	36	40	45
300 kg/m ³	5.4	0.63	1.76	40	49	57
350 kg/m ³	4.8	0.54	1.86	45	54	63
400 kg/m ³	4	0.48	1.9	40	50	69
500 kg/m ³	3	0.38	2.1	48	57	72

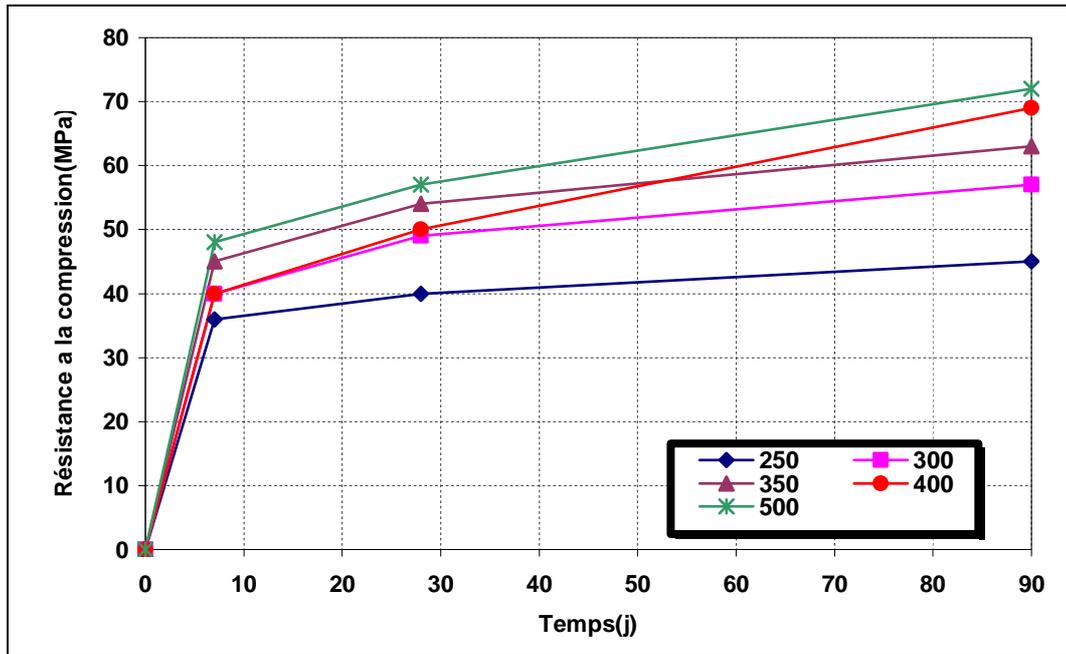


Figure 5.9 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

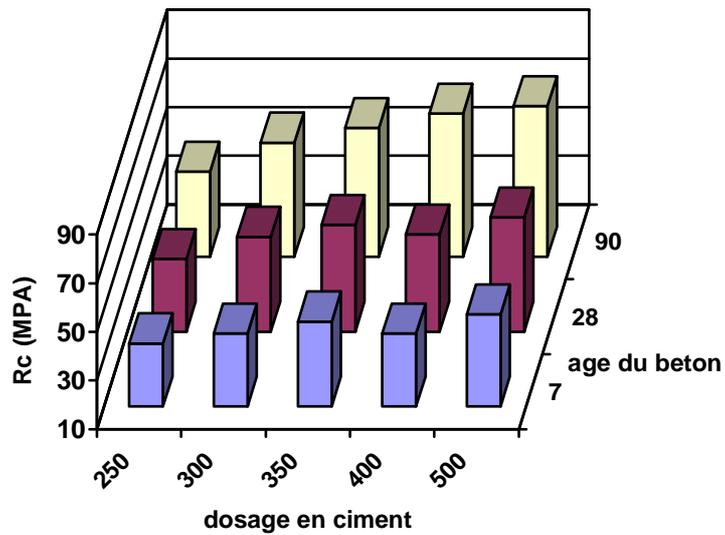


Figure 5.10 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

Des figures (5-11) et (5-12) On constate qu'à l'âge de 90^{ème} jour la résistance à la compression augmente au différents dosages de ciment, mais au 7 jour la résistance au dosage 350 et 500 kg/m³ diminue. au 28^{ème} jour, on constate que la résistance à la compression aussi au dosage 350 kg/m³ diminue.

Tableau 5-6 Résistances à la compression des bétons à base des granulats d el hadjeb pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement plastique (Formulation skramtaev)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	7.4	0.85	1.77	21	30	43
300 kg/m ³	7	0.71	1.87	35	40	55
350 kg/m ³	6.6	0.61	1.97	37	43	57
400 kg/m ³	6	0.53	2.08	38	47	60
500 kg/m ³	5.5	0.43	2.26	40	48	62

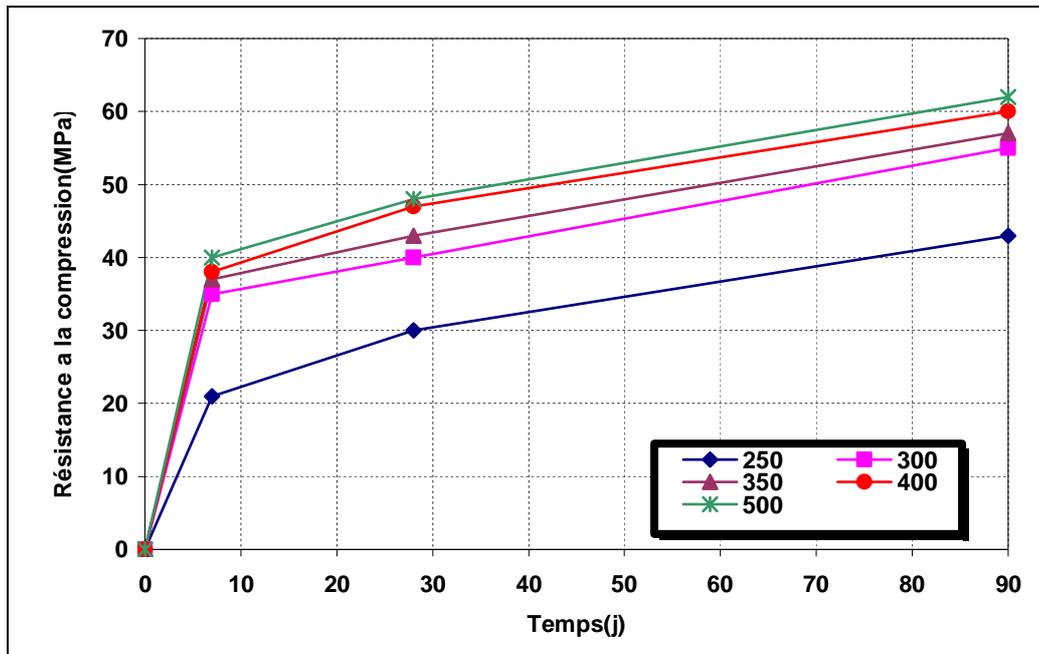


Figure 5.11 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

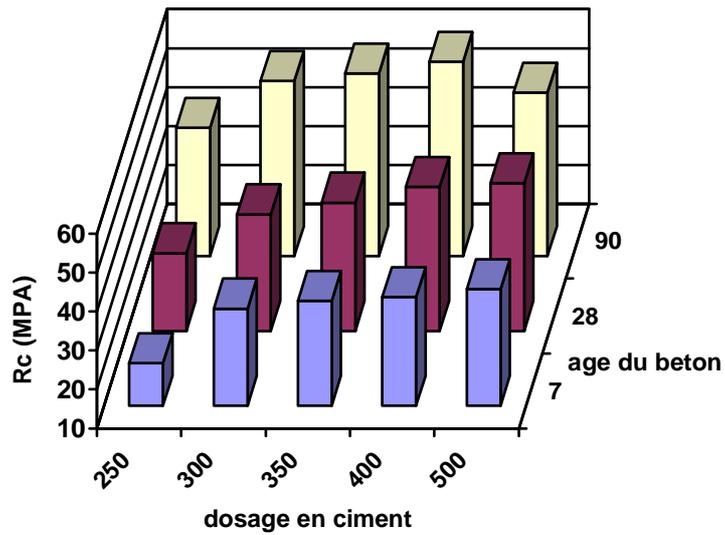


Figure 5.12 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

5.2.2-Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton a 28 jours :

Les résultats présentes par les courbes dans les figures (5-13) et (5-14) montrent au premier lieu que le rapport E/C est élevée , ce qui résulte que le gravier d 'Ain Touta à une meilleur résistance a la compression que le gravier d' Ehdjeb et de ziani .

Quand le rapport E/C est faible, la résistance à la compression est plus élevée ce qui implique que le gravier de ziani donne une meilleur résistance à la compression puis celui d Ain Touta et d Ehdjeb .plus le dosage du ciment est élevée , plus la quantité d'eau diminue, ce qui n'est pas économique et cela peut engendrer une faible etanchienite , qui donne une perméabilité, qui peut avoir un effet sur la durabilité.

On constate que le rapport optimale E/C = 0.54 au dosage du béton 350kg/m³ pour le béton ferme et pour le béton plastique E/C = 0.61 donnent la résistance à la compression la plus élevée du ziani puis celui d' Ain Touta et d'Ehdjeb en dernier.

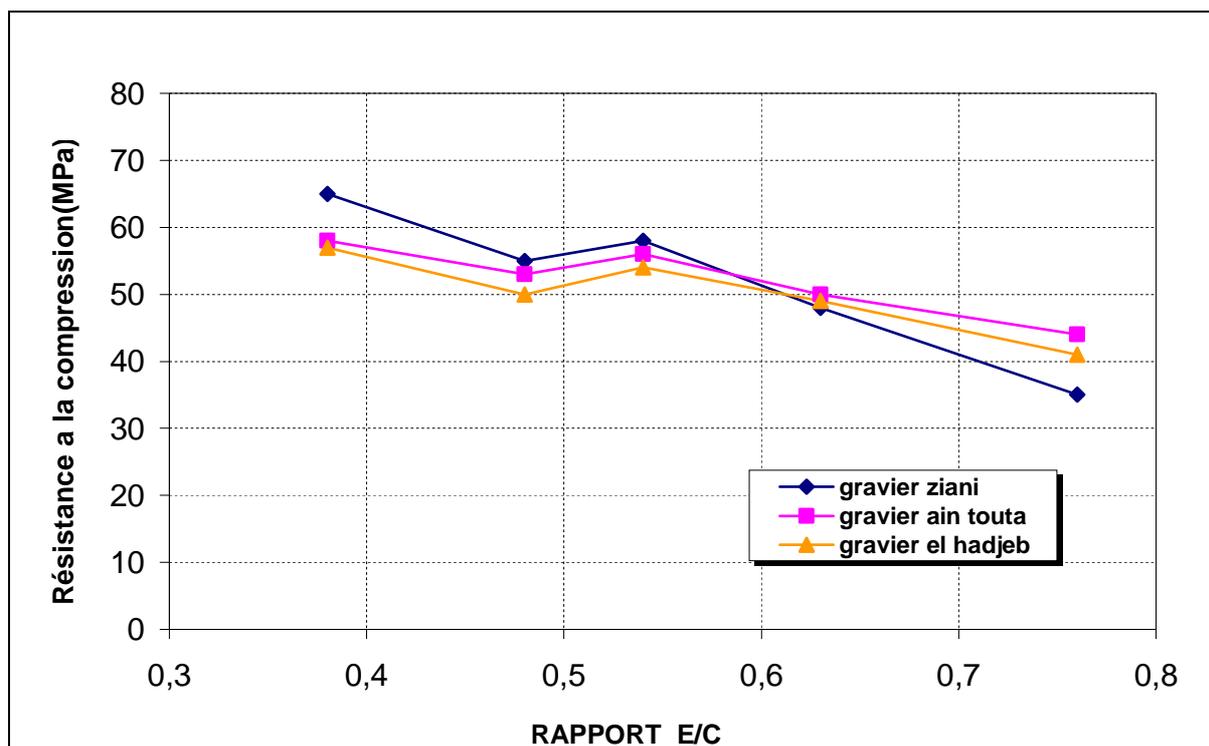


Figure 5.13 : L'évolution de la résistance à la compression du béton ferme en fonction du rapport E/C des différents graviers.

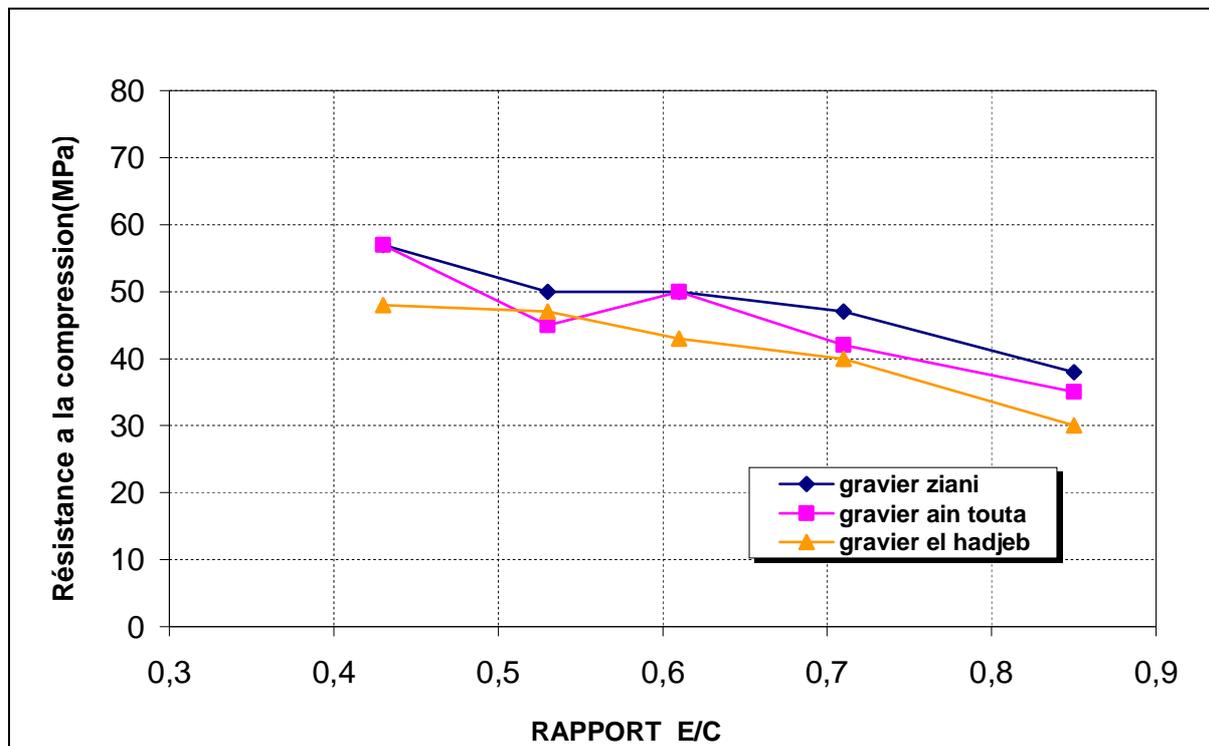


Figure 5.14 :L'évolution de la résistance à la compression du béton plastique en fonction du rapport E/C des différents graviers.

5.2.3-Influence de la granularité sur la qualité du béton :

La proportion relative de sable et de gravier doit être telle que le béton présente une homogénéité satisfaisante sans aucun risque de ségrégation. L'influence sera jugé par le rapport G/ S. Il a été constaté selon les figures (5.15) (5.16) que :

a) Plus G/S est élevé, plus le béton présentera des résistances mécaniques élevées mais par contre présente des difficultés de mise en oeuvre par manque d'ouvrabilité

b) Pour un béton plastique : riche en mortier , de bonne ouvrabilité donnant des paramètres de bonne apparence avec mise en oeuvre facile mais ne permettant pas des résistances exceptionnelles on prendra

$$1.7 < G/S < 1.8$$

C) Pour un béton normal : du béton armé courant, de plasticité variable en fonction du dosage en eau, mise en oeuvre facile et donnant de bonnes résistances

$$1.8 < G/S < 1.9$$

c) Pour un béton à forte compacité de consistance ferme présentant des résistances élevées mais sujettes à ségrégation

$$2 < G/S < 2.1 \text{ et exceptionnellement } 2.2$$

La tendance actuelle est de ne pas dépasser en générale des valeurs de G/S de 1.7 à 1.8 léger sacrifice de la résistance au profit de l'ouvrabilité.

Cette recommandation est respectée dans les formulations

Partant de ces principes on peut dire que les granulats présentent des performances suffisantes qui permettent d'obtenir des résistances élevées du béton à condition que sur chantier on respecte la formulation proposée par le laboratoire.

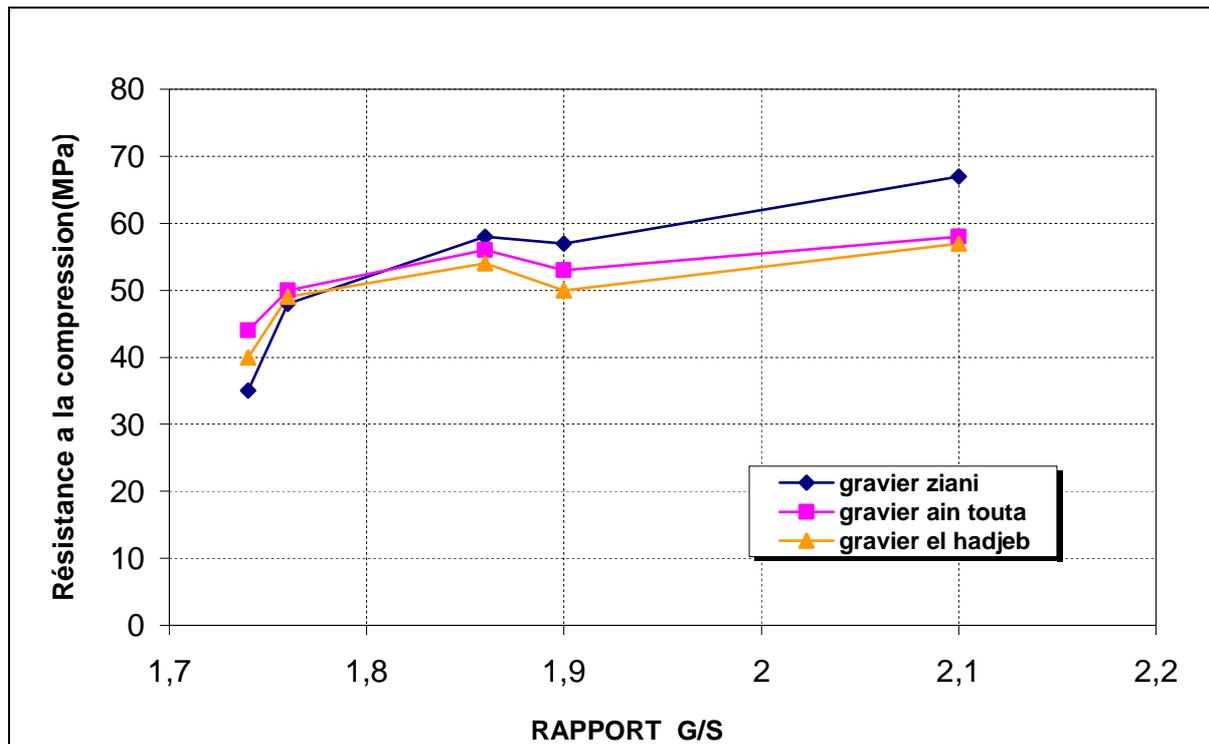


Figure 5.15 :L'évolution de la résistance à la compression du béton ferme a 28 jours en fonction du rapport G/S des différents graviers.

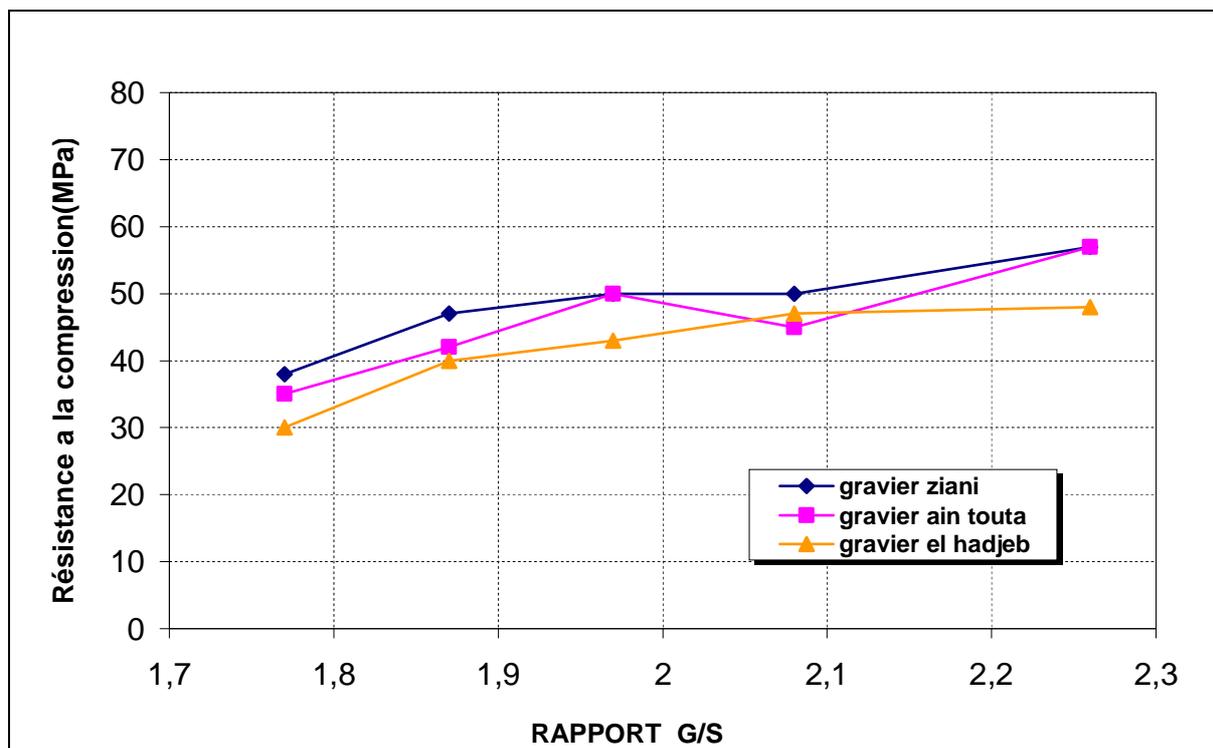


Figure 5.16 : L'évolution de la résistance à la compression du béton plastique a 28 jours en fonction du rapport G/S des différents graviers.

5.3-FORMULATION DU BETON AVEC LA METHODE DE FORMULATION DREUX GORISSE : [10]

5.3.1-Résistance à la compression :

Des figures (5-17) et (5-18) On constate qu'à l'âge de 90^{ème} jour la résistance à la compression augmente aux différents dosages de ciment, mais au 7 jour la résistance chute au dosage 500 kg/m³. Au 28^{ème} jour, on constate que la résistance à la compression au dosage 350 kg/m³ dépasse celle de 400 kg/m³.

Tableau 5-7 Résistances à la compression des bétons à base des granulats de ziani pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement ferme (Formulation dreux gorisse)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	6.1	0.75	1.42	35	44	46
300 kg/m ³	6.5	0.62	1.42	46	51	60
350 kg/m ³	5	0.54	1.42	49	59	63
400 kg/m ³	4.1	0.47	1.42	50	55	68
500 kg/m ³	3.8	0.38	1.42	55	64	70

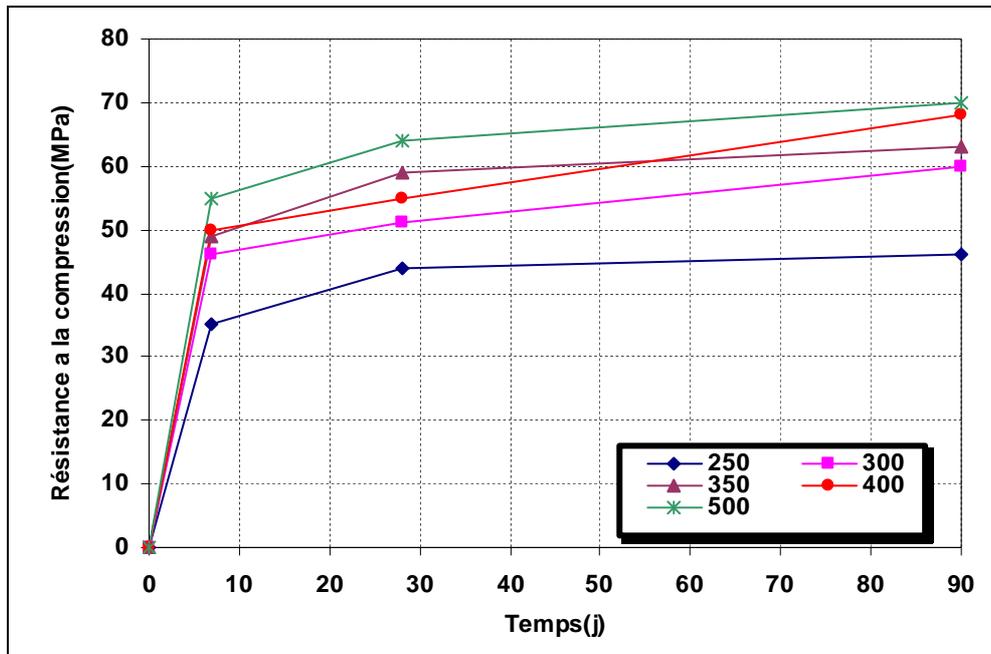


Figure 5.17 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

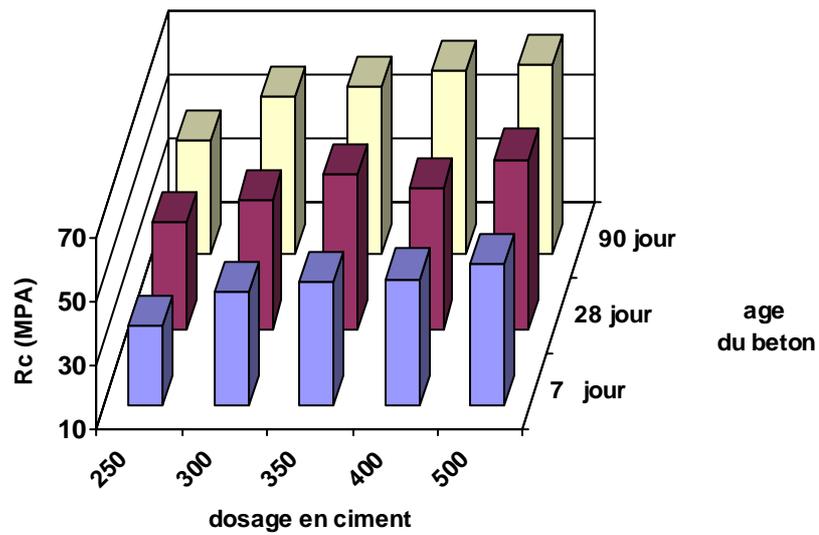


Figure 5.18 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

Des figures (5-19) et (5-20), On constate qu'à l'âge de 7 jour la résistance à la compression augmente au différents dosages de ciment, mais au 28^{eme} jour au 90^{eme} jour, on constate que la résistance à la compression au dosage 350 kg/m³ dépasse celle du dosage 400 kg/m³.

Tableau 5-8 Résistances à la compression des bétons à base des granulats de ziani pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement plastique (Formulation dreux gorisse)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	7.4	0.88	1.42	23	28	33
300 kg/m ³	6.5	0.73	1.42	31	38	42
350 kg/m ³	6	0.62	1.42	38	48	56
400 kg/m ³	5.6	0.55	1.42	40	45	52
500 kg/m ³	5	0.44	1.42	50	58	64

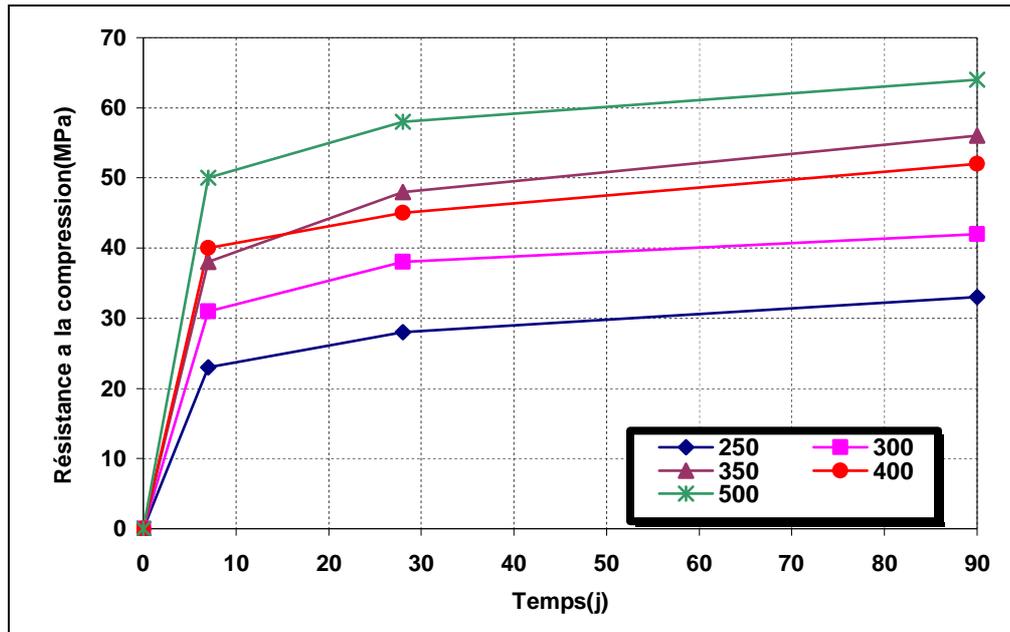


Figure 5.19 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

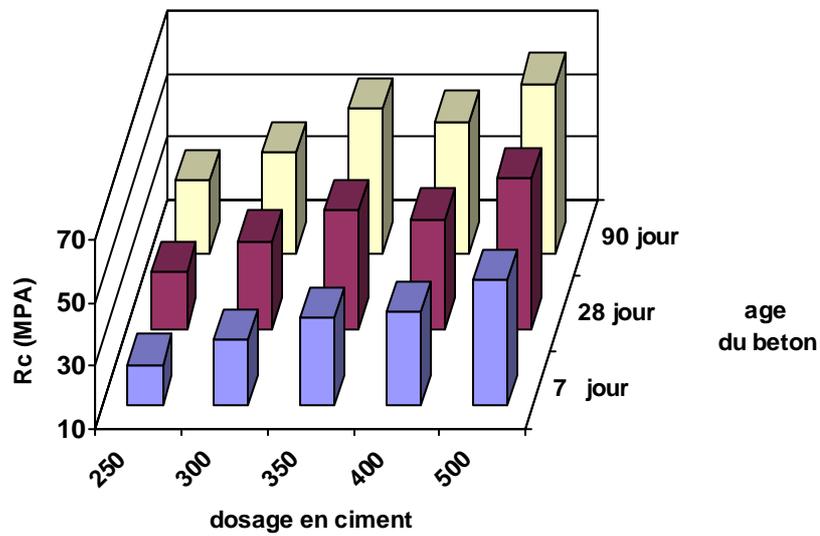


Figure 5.20 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

Des figures (4-21) et (4-22) On constate qu'à l'âge de 90^{ème} jour la résistance à la compression augmente au différents dosages de ciment, mais au 7 jour au 28^{ème} jour, on constate que la résistance à la compression au dosage 350 kg/m³ dépasse celle du dosage 400 kg/m³ .

Tableau 5-9 Résistances à la compression des bétons à base des granulats d el hadjeb pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement ferme (Formulation dreux gorisse)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	6.3	0.75	1.61	40	45	51
300 kg/m ³	5.9	0.62	1.61	48	56	60
350 kg/m ³	5	0.54	1.61	50	58	65
400 kg/m ³	4.3	0.47	1.61	45	55	62
500 kg/m ³	3.7	0.38	1.61	52	60	68

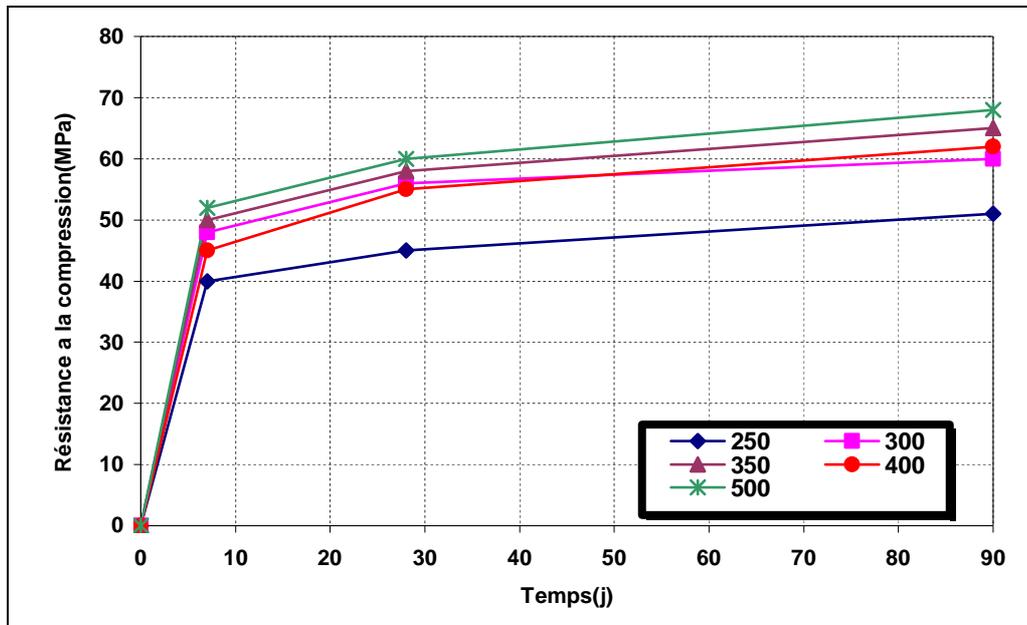


Figure 5.21 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

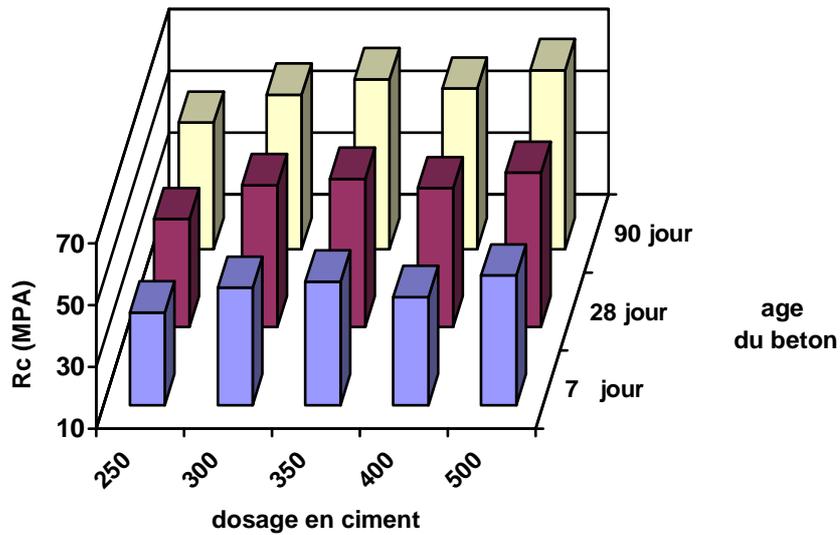


Figure 5.22 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

Des figures (5-23) et (5-24), On constate qu'à l'âge de 7 jour la résistance à la compression augmente au différents dosages de ciment, mais au 28^{eme} jour au 90^{eme} jour, on constate que la résistance à la compression au dosage 350 kg/m³ dépasse celle du dosage 400 kg/m³.

Tableau 5-10 Résistances à la compression des bétons à base des granulats d el hadjeb pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement plastique (Formulation dreux gorisse)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	7.5	0.88	1.61	28	36	43
300 kg/m ³	6.5	0.73	1.61	32	42	48
350 kg/m ³	6	0.62	1.61	38	50	60
400 kg/m ³	5.6	0.55	1.61	40	45	60
500 kg/m ³	5.2	0.44	1.61	48	59	69

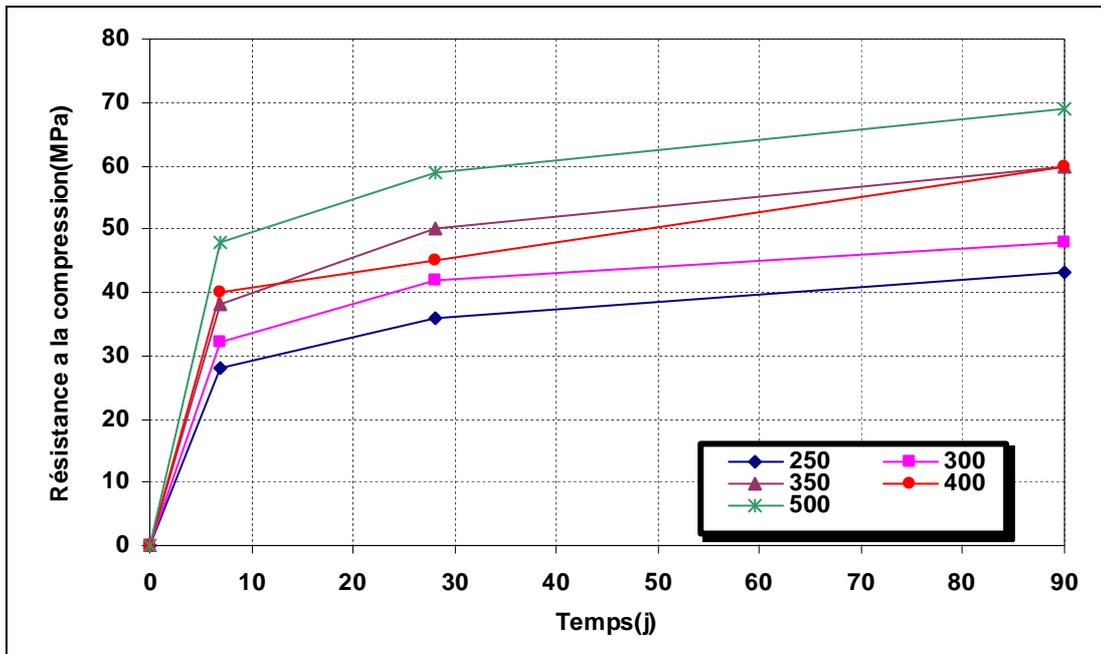


Figure 5.23 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

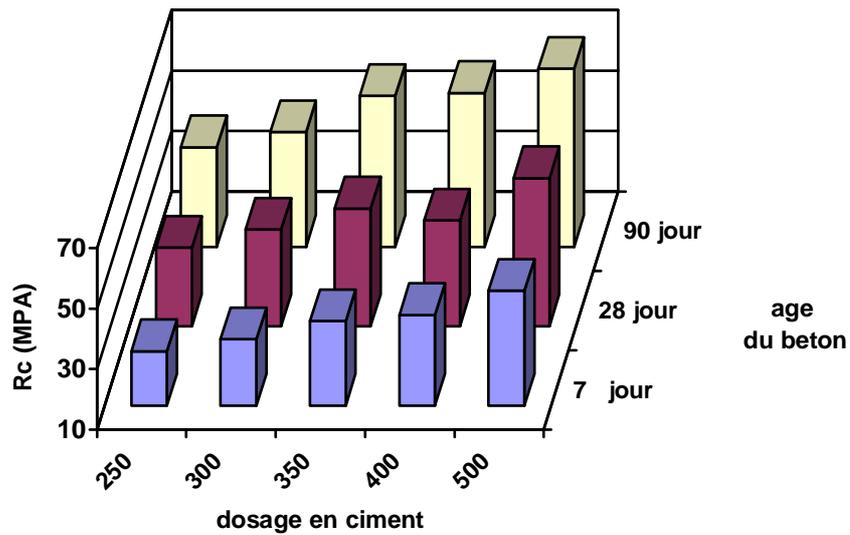


Figure 5.24 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

Des figures (5-25) et (5-26), On constate qu'à l'âge de 7 jour et au 28^{ème} jour la résistance à la compression chute au dosage 400 kg/m³, mais au 90^{ème} jour, on constate que la résistance à la compression au dosage 350 kg/m³ est la meilleur de 80 MPA .

Tableau 5-11 Résistances à la compression des bétons à base des granulats d Ain touta pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement ferme (Formulation dreux gorisse)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	7.6	0.75	1.61	40	52	62
300 kg/m ³	7	0.62	1.61	45	57	70
350 kg/m ³	6	0.54	1.61	55	65	80
400 kg/m ³	5.5	0.47	1.61	50	60	76
500 kg/m ³	5.2	0.38	1.61	60	65	76

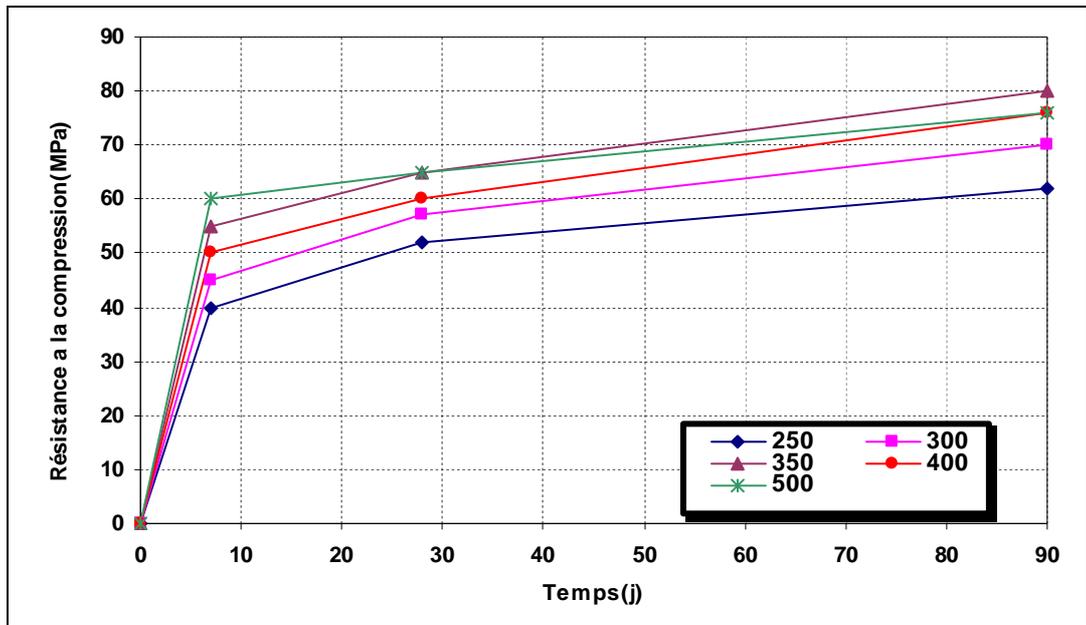


Figure 5.25 :L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

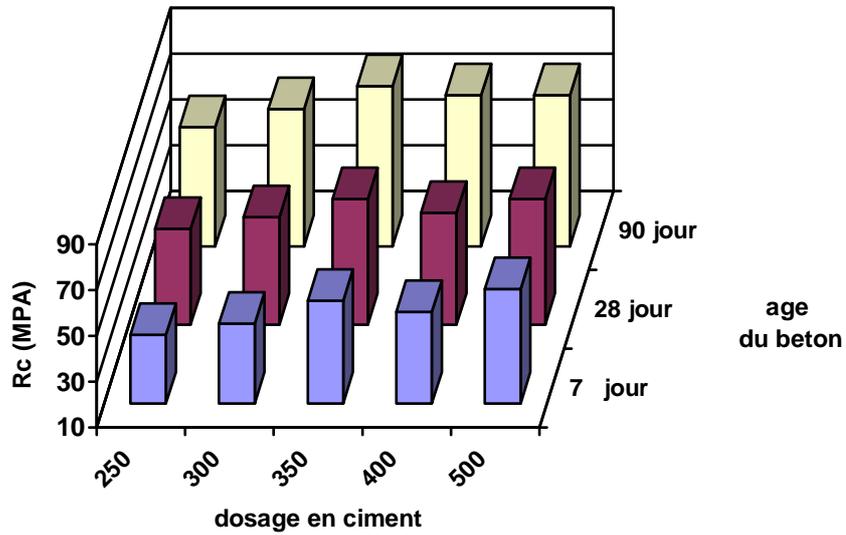


Figure 5.26 :L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

Des figures (5-27) et (5-28), On constate qu'à l'âge de 7 jour et au 28^{eme} jour la résistance à la compression chute au dosage 400 kg/m³, mais au 90^{eme} jour, on constate que la résistance à la compression augmente au différents dosages de ciment.

Tableau 5-12 Résistances à la compression des bétons à base des granulats d Ain touta pour des différents dosages de ciments et avec un affaissement plastique (Formulation dreux gorisse)

HTS Dosages	Affaissement de béton en cm	E/C	G/S	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
250 kg/m ³	7.7	0.88	1.61	23	30	40
300 kg/m ³	7	0.73	1.61	32	43	55
350 kg/m ³	6.2	0.62	1.61	40	50	61
400 kg/m ³	5.7	0.55	1.61	35	48	61
500 kg/m ³	5	0.44	1.61	46	58	68

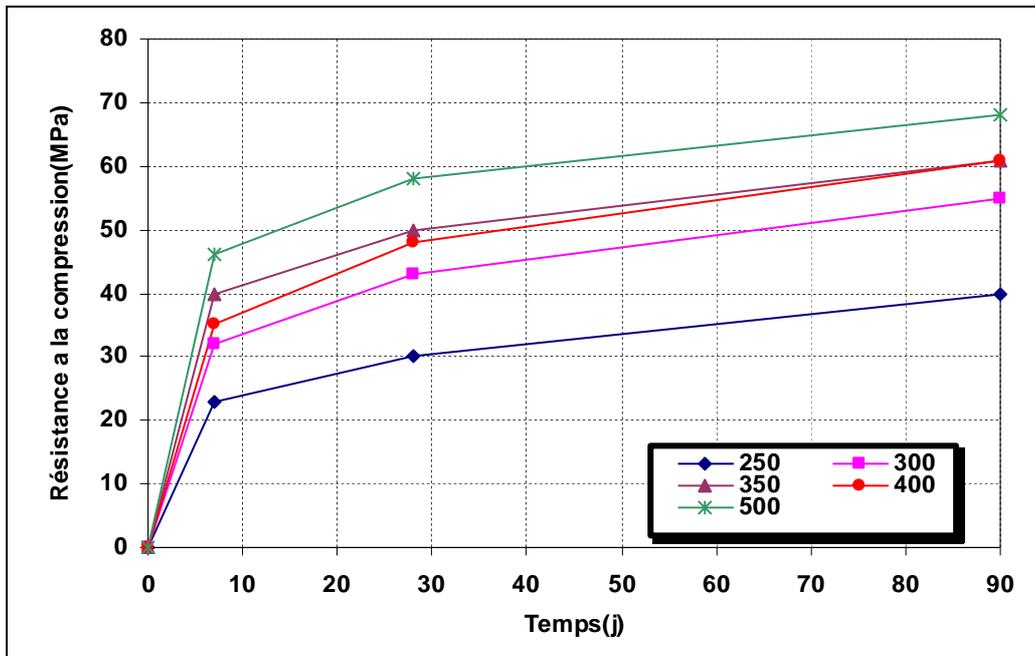


Figure 5.27 :L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

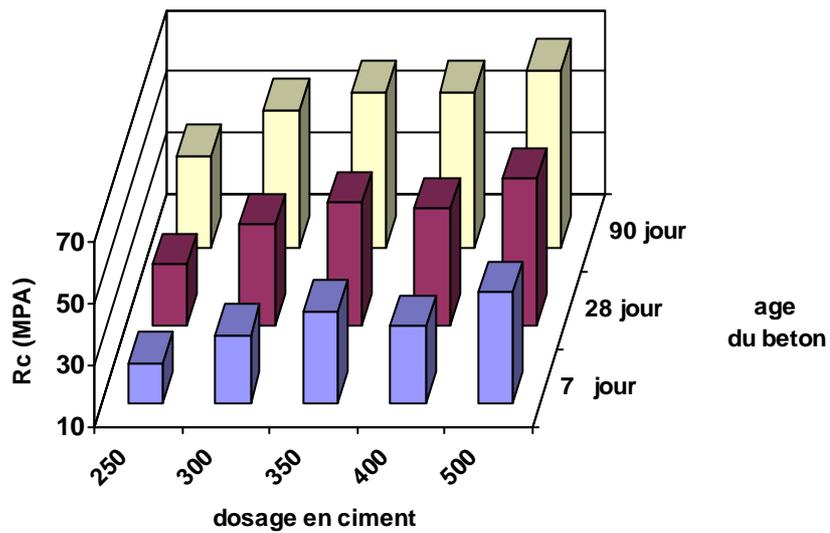


Figure 5.28 :L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et des différents dosages de ciments

5.3.2- Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton a 28 jours :

Les résultats présentes par les courbes dans les figures (5-29) et (5-30) montrent au premier lieu que le rapport E/C est élevée , ce qui résulte que le gravier d'Ehdjeb a une meilleur résistance à la compression que le gravier d'Ain Touta et de ziani .

Quand le rapport E/C est faible, la résistance à la compression est plus élevée ce qui implique que le gravier de ziani donne une meilleur résistance a la compression puis celui d'Ain Touta et d'Ehdjeb .plus le dosage du ciment est élevée , plus la quantité d'eau diminue, ce qui n'est pas économique et cela peut engendrer une faible etanchienite , qui donne une perméabilité, qui peut avoir un effet sur la durabilité.

On constate que le rapport optimale E/C = 0.54 au dosage du béton 350kg/m^3 pour le béton ferme et pour le béton plastique E/C = 0.62 donnent la résistance a la compression la plus élevée d'Ain Touta puis celui du ziani et d' Ehdjeb en dernier.

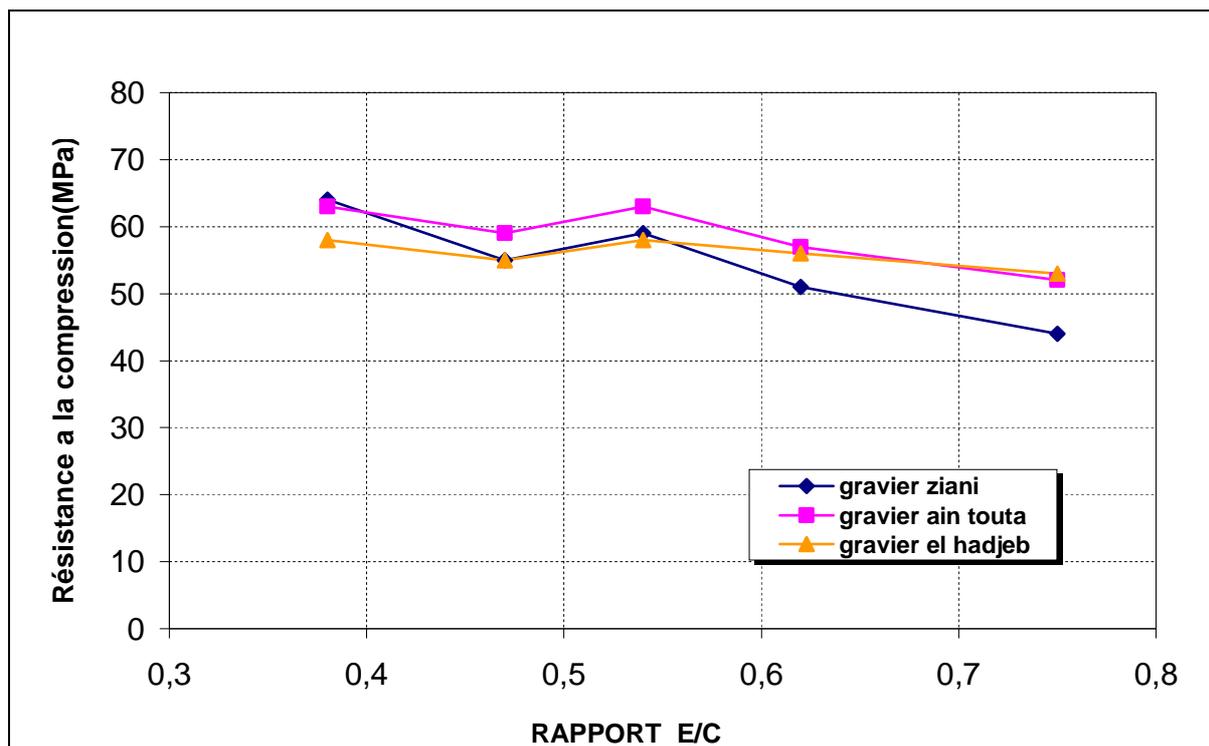


Figure 5.29: L'évolution de la résistance à la compression du béton ferme en fonction du rapport E/C des différents graviers.

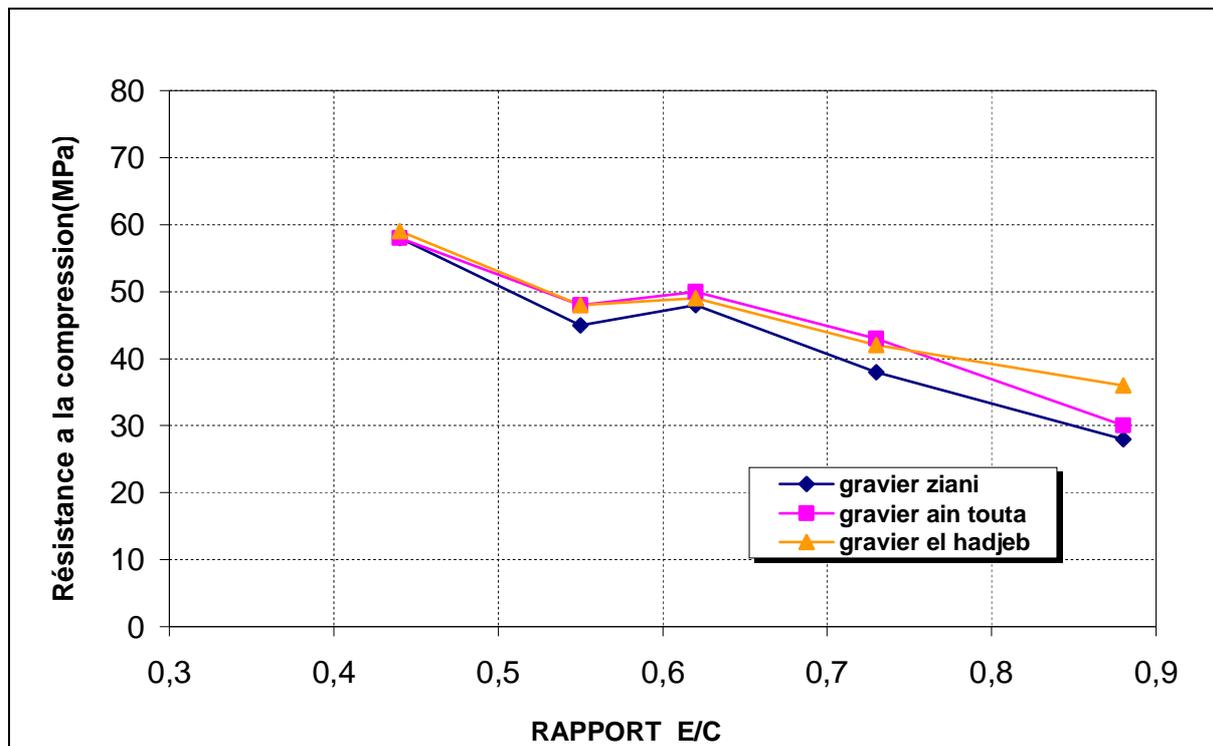


Figure 5.30 :L'évolution de la résistance à la compression du béton plastique en fonction du rapport E/C des différents graviers.

5.3.3- Influence de la granularité sur la qualité du béton :

La proportion relative de sable et de gravier doit être telle que le béton présente une homogénéité satisfaisante sans aucun risque de ségrégation. L'influence sera jugé par le rapport G/S . Il a été constaté selon les résultats des tableaux (5-7,....., 5-12) que :

Le G/S est constant pour le gravier du ziani $G/S=1.42$ que ça soit ferme ou plastique et toujours constant aussi pour le gravier d Ain touta et d Elhadjeb $G/S=1.61$

On peut dire que les granulats présents des performances suffisantes qui permettent d'obtenir des résistances élevées du béton à condition que sur chantier on respecte la formulation proposée par le laboratoire.

5.4- COMPARAISON ENTRE LA METHODE DE SKRAMTAEV ET LA METHODE DE DREUX GORISSE :

Du tableau 5-13 on constate que les résultats des deux méthodes son fiable que ce soit pour le béton ferme ou plastique et aussi pour les différents granulats.

La méthode de Dreux Gorisse , pour assure la même résistance du béton , exige beaucoup plus de liant que la méthode de Skramtaev , on pourrait dire que cette méthode assure surtout l'ouvrabilité désirée.

Quand à la méthode de Skramtaev, elle assure généralement la résistance voulue mais pour ce qui est de l'ouvrabilité elle exige toujours des corrections du dosage en eau ce qui influe sur le dosage des autres composants.

Tableau 5-13 comparaison entre la méthode de skramtaev et la méthode de dreux gorisse

	Affaissement de béton	R _C 28 jour MPA gravier ziani	R _C 28 jour MPA gravier ain touta	R _C 28 jour MPA gravier el hadjeb
Méthode de Skramtaev	Ferme	58	56	54
	plastique	50	50	43
Méthode de Dreux Gorisse	Ferme	59	63	58
	plastique	48	50	49

5.5- RESISTANCE DU BETON AVEC L'AJOUT D'UN SUPER PLASTIFIANT :

L'utilisation du super plastifiant permet la confection des bétons de maniabilité normale, mais ayant une résistance élevée en raison d'une réduction substantielle du rapport E /C (eau /ciment).

Dans le cadre de notre étude le super plastifiant utilisé est un plastifiant de type (PLASTACRYL 85 GRANITEX) qui à été incorporé sur les trois graviers de ziani ,d'Ain Touta et d'El Hadjeb respectivement avec le dosage de 350kg/m³ .

Tableau 5-14: Influence de l'ajout d'un super plastifiant sur la résistance des bétons à base d'agrégats de ziani.

HTS Dosages	% de super plastifiant	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
350 kg/m ³	0.05	45	65	73
	0.25	46	72.50	76
	0.5	46	62	68

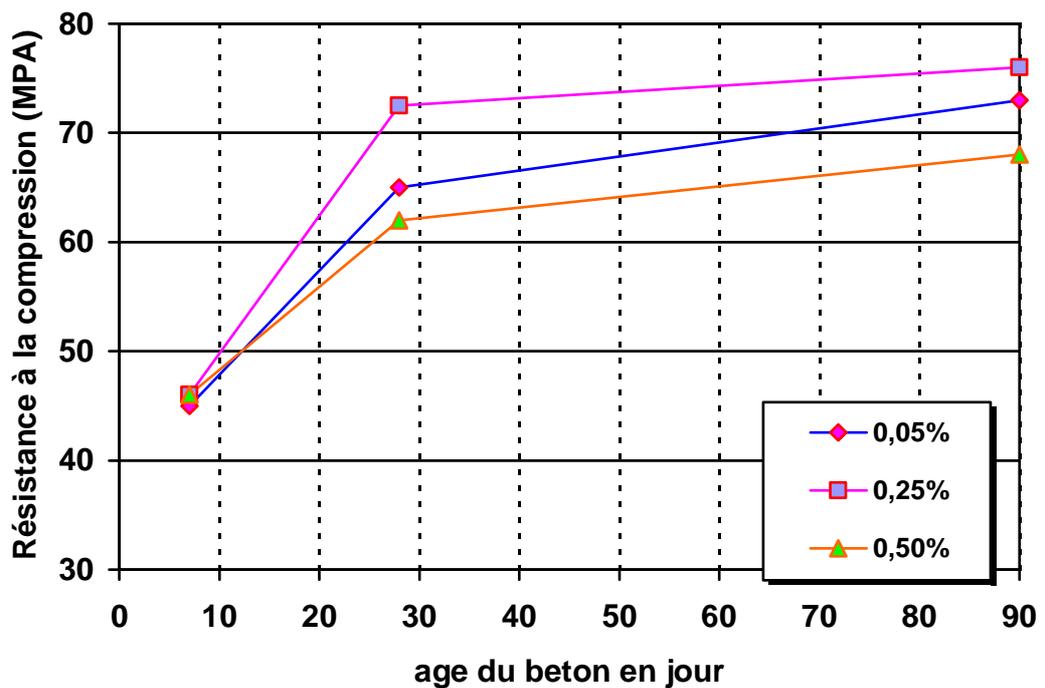


Figure 5-31 : Effet de l'ajout du super plastifiant sur la résistance des bétons à base d'agrégats de ziani.

On constate de la Figure (5-31) que la résistance à la compression au différents pourcentages d'adjuvant au 7^{ème} jour est la même, mais au 28^{ème} jour et au 90^{ème} jour on voit que le meilleur pourcentage d'adjuvant est de 0.25% qui donne la résistance à la compression la plus élevée, par rapport au pourcentage d'adjuvant 0.05% et 0.5% .on remarque qu'il y a une léger diminution de la résistance à la compression.

Tableau 5-15: Influence de l'ajout d'un super plastifiant sur la résistance des bétons à base d'agrégats d Ain Touta.

HTS Dosages	% de super plastifiant	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
350 kg/m ³	0.05	31	56.50	60
	0.25	35	58	65
	0.5	39	49	59

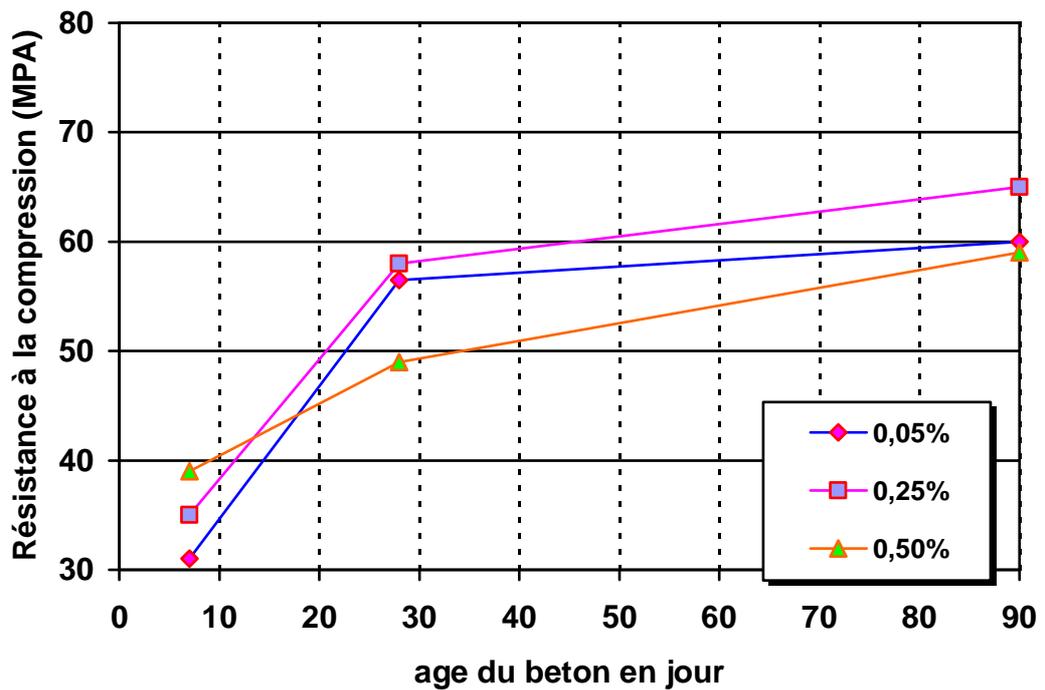


Figure 5-32 : Effet de l'ajout du super plastifiant sur la résistance des bétons à base d'agrégats de d Ain Touta.

On constate de la Figure (5-32) que le pourcentage 0.5% d'adjuvant au 7^{ème} jour a une valeur plus élevée que les pourcentages 0.25% et 0.05% respectivement, mais au 28^{ème} jour et au 90^{ème} jour en voie augmentation de la résistance à la compression.

Tableau 5-16: Influence de l'ajout d'un super plastifiant sur la résistance des bétons à base d'agrégats d El Hadjeb.

HTS Dosages	% de super plastifiant	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
350 kg/m ³	0.05	36	59.50	61
	0.25	44	65	70
	0.5	51	62	70

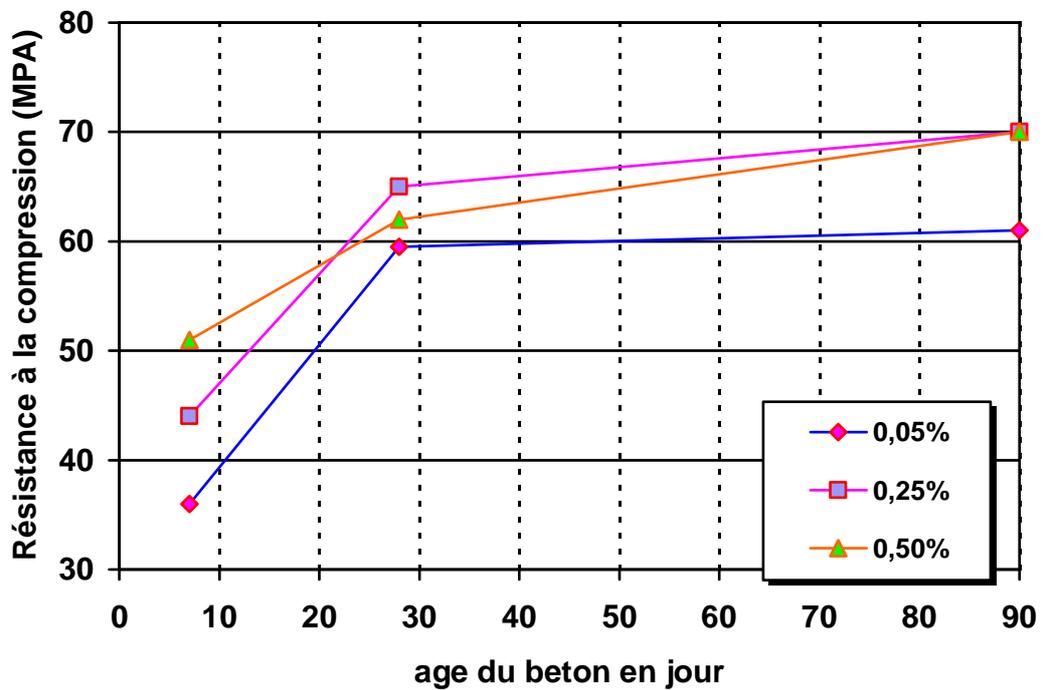


Figure 5-33 : Effet de l'ajout du super plastifiant sur la résistance des bétons à base d'agrégats de d El Hadjeb.

On constate de la Figure (5-33) que le pourcentage 0.5% d'adjuvant au 7^{ème} jour a une valeur plus élevée que les pourcentages 0.25% et 0.05% respectivement, mais au 28^{ème} jour et au 90^{ème} jour en voie augmentation de la résistance a la compression .mais en remarque que le pourcentage de 0.5% et plus élevée que celui de 0.05%.

5.6- EFFET D'AJOUT DE FILLER(POUVRE DE CARRELAGE) SUR LA RESISTANCE DU BETON :

La très grande surface spécifique de la poudre de carrelage, qui doit être mouillée, augmente le besoin en eau en sorte que, dans les bétons de faible rapport eau / liant, il est nécessaire d'utiliser un super plastifiant .De cette façon, il est possible de conserver à la fois le rapport eau /ciment spécifié et la maniabilité nécessaire

Tableau 5-17: Influence de l'ajout de filler sur la résistance des bétons à base d'agrégats de ziani.

HTS Dosages	% filler	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
350 kg/m ³	8	49.5	67	70
	15	49.5	64	67

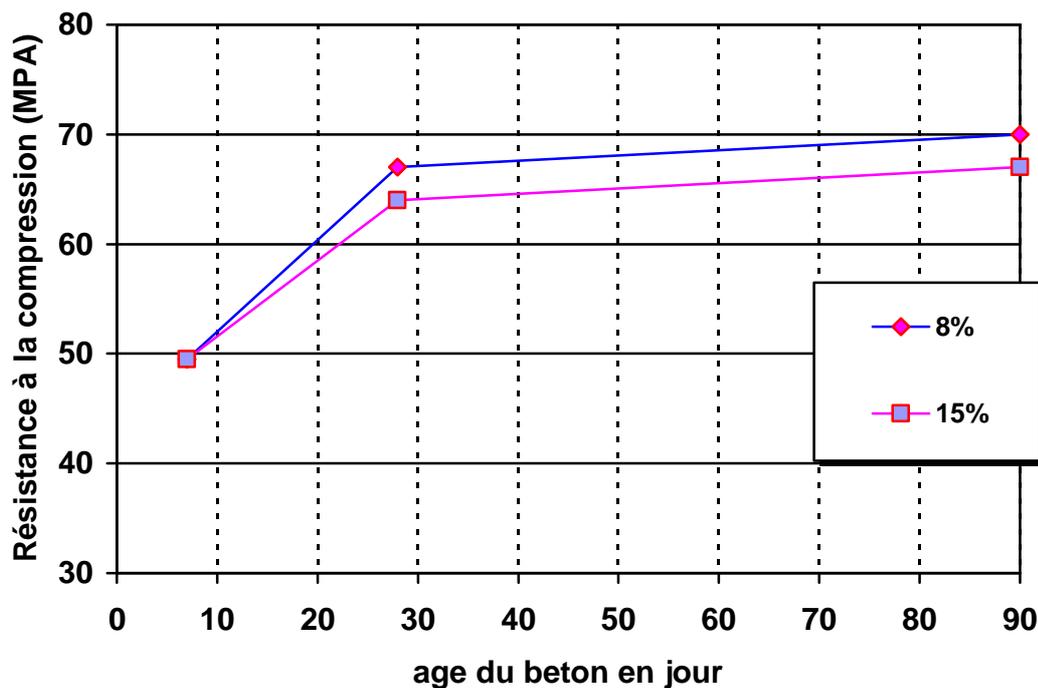


Figure 5-34 : Effet de l'ajout de filler sur la résistance des bétons à base d'agrégats de ziani
Tableau 5-18: Influence de l'ajout de filler sur la résistance des bétons à base d'agrégats d'El Hadjeb.

HTS Dosages	% filler	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
350 kg/m ³	8	47	68	71
	15	47	58	66

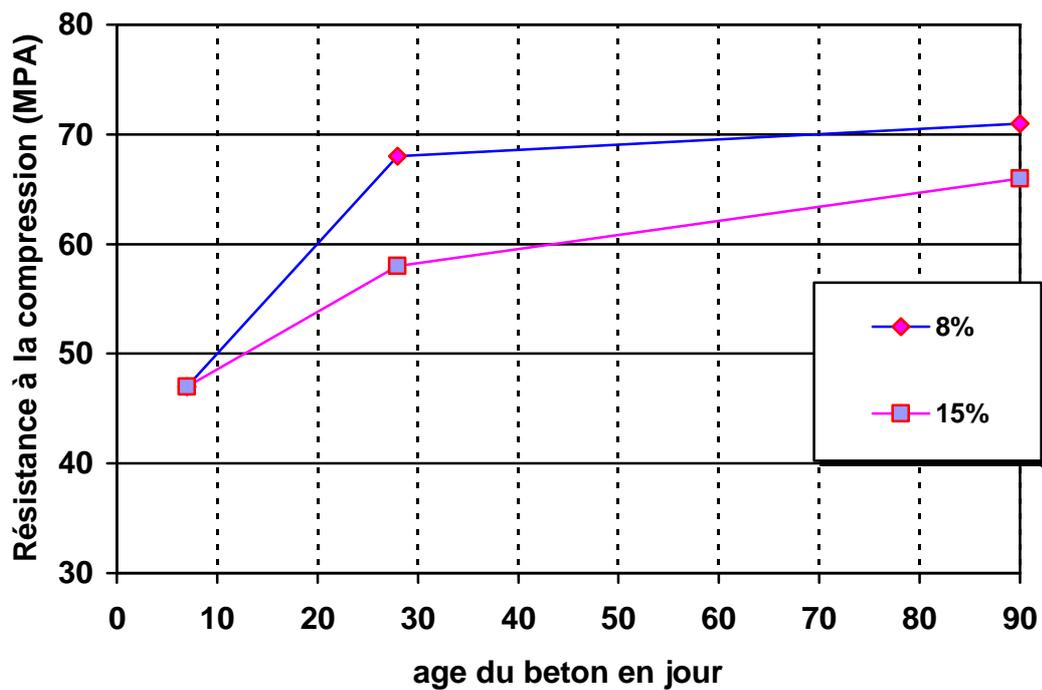


Figure 5-35 : Effet de l'ajout de filler sur la résistance des bétons à base d'agrégats d'El Hadjeb.

Tableau 5-19: Influence de l'ajout de filler sur la résistance des bétons à base d'agrégats d'Ain Touta.

HTS Dosages	% filler	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA	R _C 90 jour MPA
350 kg/m ³	8	46	65	70
	15	45	61	67

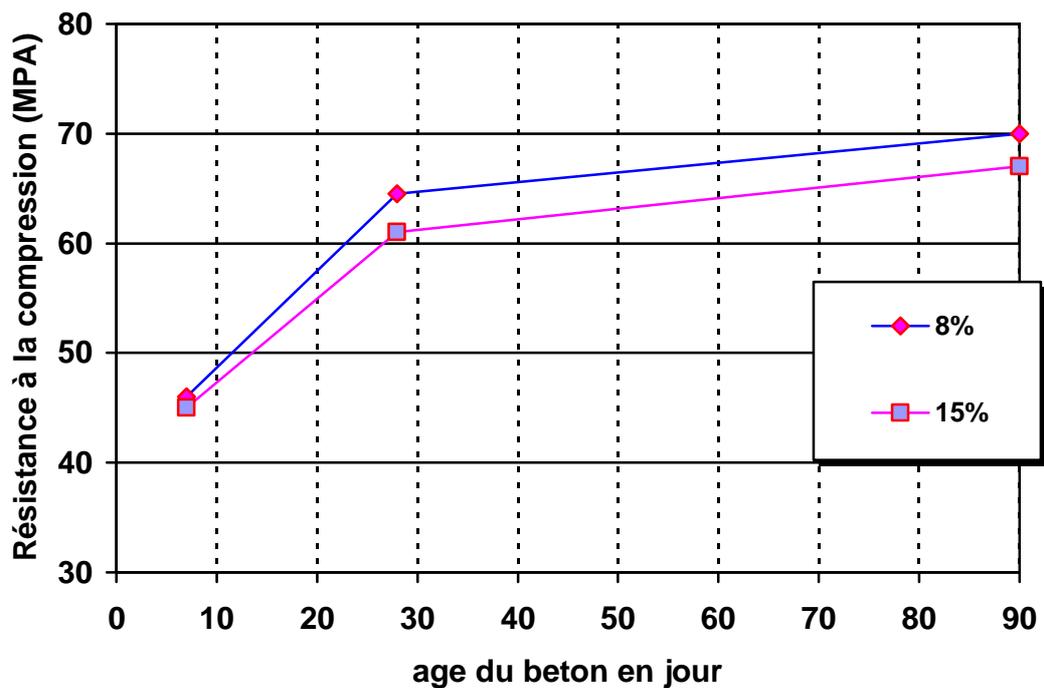


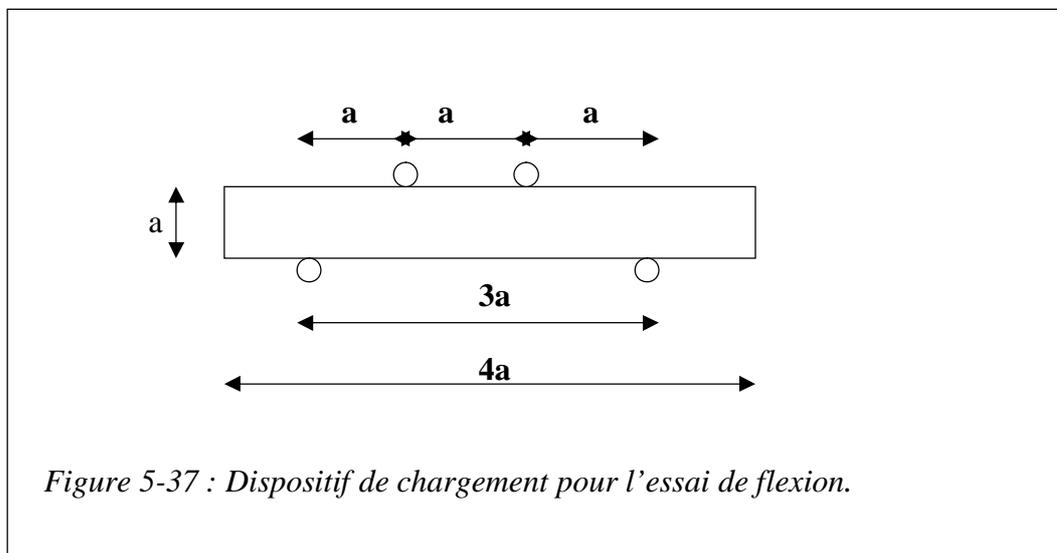
Figure 5-36 : Effet de l'ajout de filler sur la résistance des bétons à base d'agrégats d'Ain Touta

Les Figure (5-34) (5-35) (5-36) représentent l'effet de l'ajout de filler sur la résistance du béton à base des trois agrégats étudiés, on distingue que le pourcentage de filler de 8% donne de meilleurs résistances a la compression par rapport au pourcentage de 15% .on dit qu'au delà du pourcentage de 8% il y a une diminution de résistances a la compression.

On constate que la présence de filler (poudre de carrelage) dans les bétons à base de différents types d'agrégats concassés influe de façon significative les propriétés mécaniques de ces derniers et d'une manière analogue que pour les bétons conventionnels. Cette action particulière est due au fait que les grains de filler ont un diamètre environ 100 fois plus petit que celui des plus petits grains de ciment, et que cette finesse des grains diminue le ressuage puisque aucune eau de ressuage n'est piégée sous les gros granulats. Par conséquent, la porosité habituellement observée à l'interface gros granulat-pâte de ciment hydraté est réduite comparée à celle observée dans un béton sans fumée de silice ce qui entraîne une amélioration tant de la résistance que de la perméabilité.

5.7- RESISTANCE A LA FLEXION DES BETONS :

Dans cet essai un prisme de béton non armé de $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$ est soumis à un effort de flexion par application jusqu'à rupture (voir photo 5-1) d'une charge en deux points symétriques. Les points d'application de la charge étant placés aux tiers de la portée [50] (voir figure 5-37).



La résistance à la flexion est donnée par la formule suivante : $R_f = \frac{3.F}{a^2} \text{ (MPa)}$

F : la charge de rupture (en newtons).

a : cote de la section carrée de l'éprouvette (mm).

Analyse et discussion des résultats

Dans le cadre de cette étude, on a effectué cet essai sur les bétons a bases des trois granulats qui font l'objet de ce projet dosées à 350 kg/m^3 après 7 jours et 28 jours de cure dans l'eau à 22°C , les résultats sont portés sur les tableaux (5-20) (5-21) (5-22).



Photo 5-1 : rupture des éprouvettes « essai de flexion ».

Tableau 5-20: Influence de l'ajout de filler et de super plastifiant sur la résistance des bétons a la flexion à base d'agrégats d El Hadjeb.

HTS Dosages	8% filler 0.25 % adj	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA
350 kg/m ³	Sans adj	5.1	7.05
	avec adj	7.05	7.05
	Ajout+adj	6	6.9

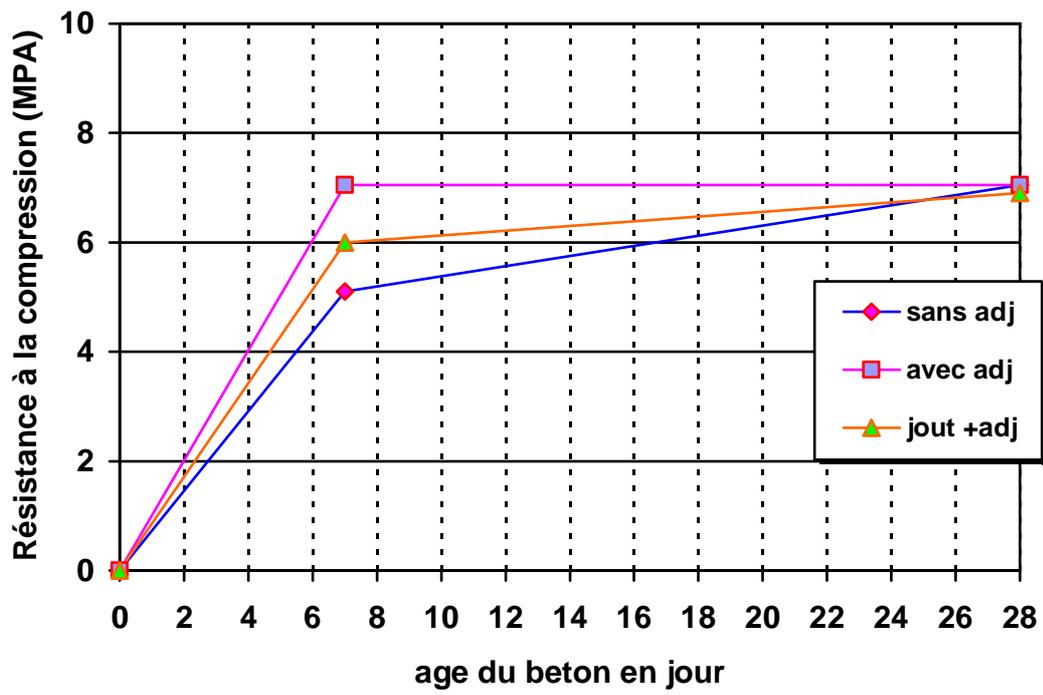


Figure 5-38 : Effet de l'ajout de filler et de super plastifiant sur la résistance des bétons à base d'agrégats d'El Hadjeb.

Tableau 4-21: Influence de l'ajout de filler et de super plastifiant sur la résistance des bétons a la flexion à base d'agrégats d Ain Touta.

HTS Dosages	8% filler 0.25 % adj	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA
350 kg/m ³	Sans adj	6	6
	avec adj	6.4	6.9
	Ajout+adj	5.1	5.8

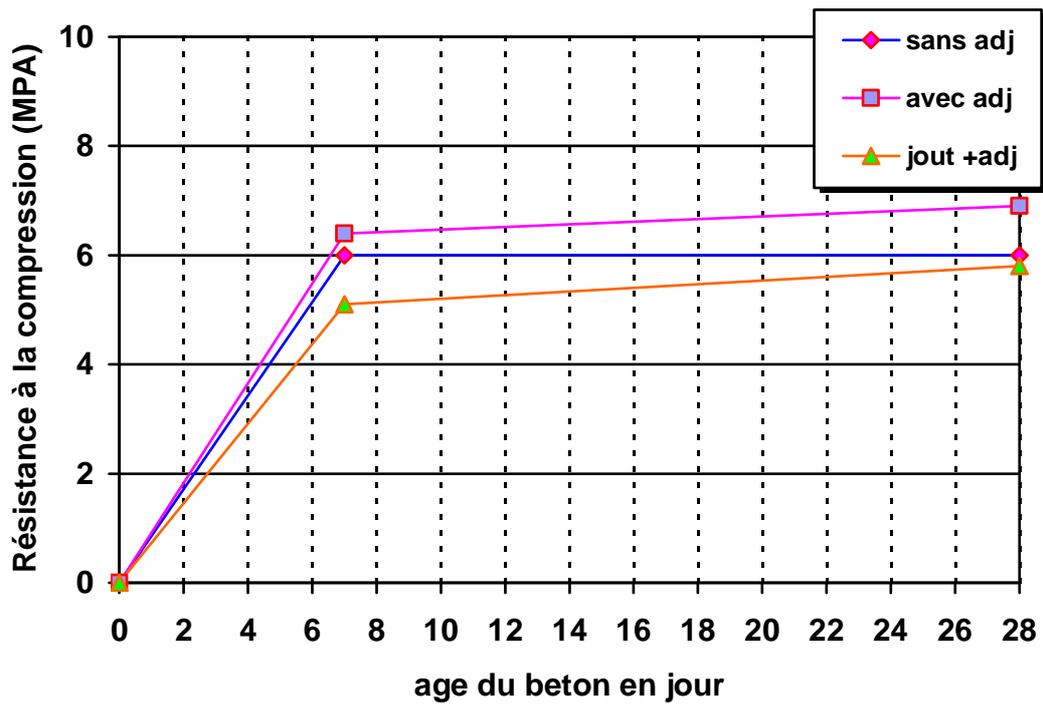


Figure 5-39 : Effet de l'ajout de filler et de super plastifiant sur la résistance des bétons à base d'agrégats d Ain Touta.

Tableau 5-22: Influence de l'ajout de filler et de super plastifiant sur la résistance des bétons a la flexion à base d'agrégats de ziani.

HTS Dosages	8% filler 0.25 % adj	R _C 7 jour MPA	R _C 28 jour MPA
350 kg/m ³	Sans adj	5.1	6.9
	avec adj	5.4	7.5
	Ajout+adj	3.6	6.45

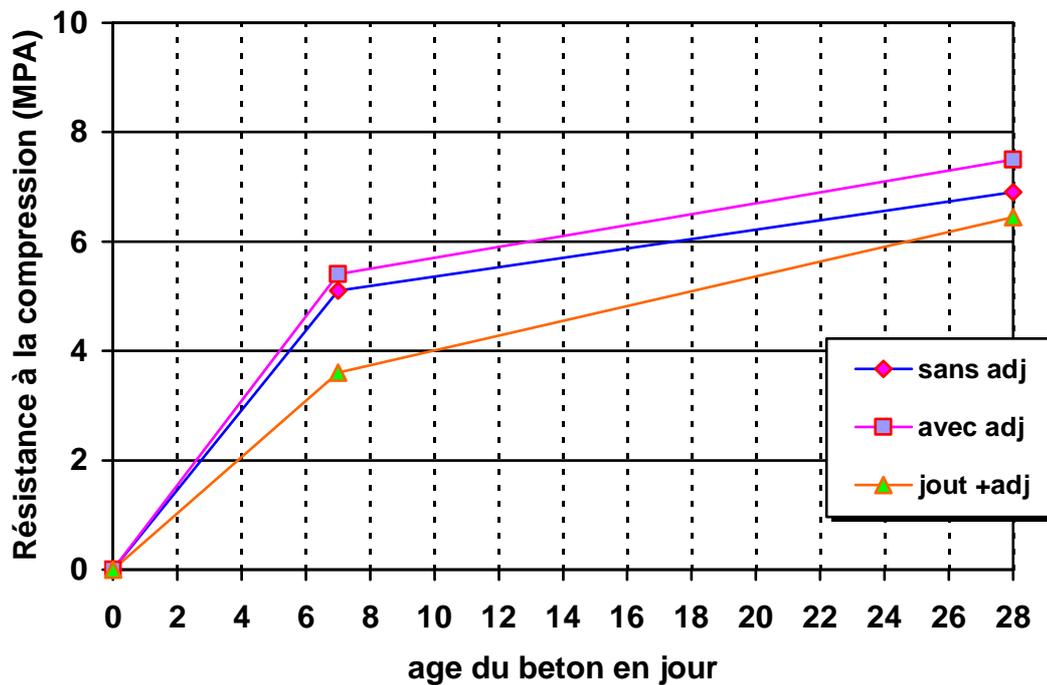


Figure 5-40 : Effet de l'ajout de filler et de super plastifiant sur la résistance des bétons à base d'agrégats de ziani .

5.8- RESISTANCE A LA TRACTION

Afin de déterminer la résistance en traction du matériau, l'essai Brésilien (ASTM C 496) a été utilisé. Il consiste à appliquer une charge sur un cylindre de béton couché de manière à le diviser en deux prismes semi-circulaires (voir photo 5.2). La figure 5-41 montre la répartition des contraintes dans la section de béton de même que l'équation servant à déterminer la résistance en traction du matériau.

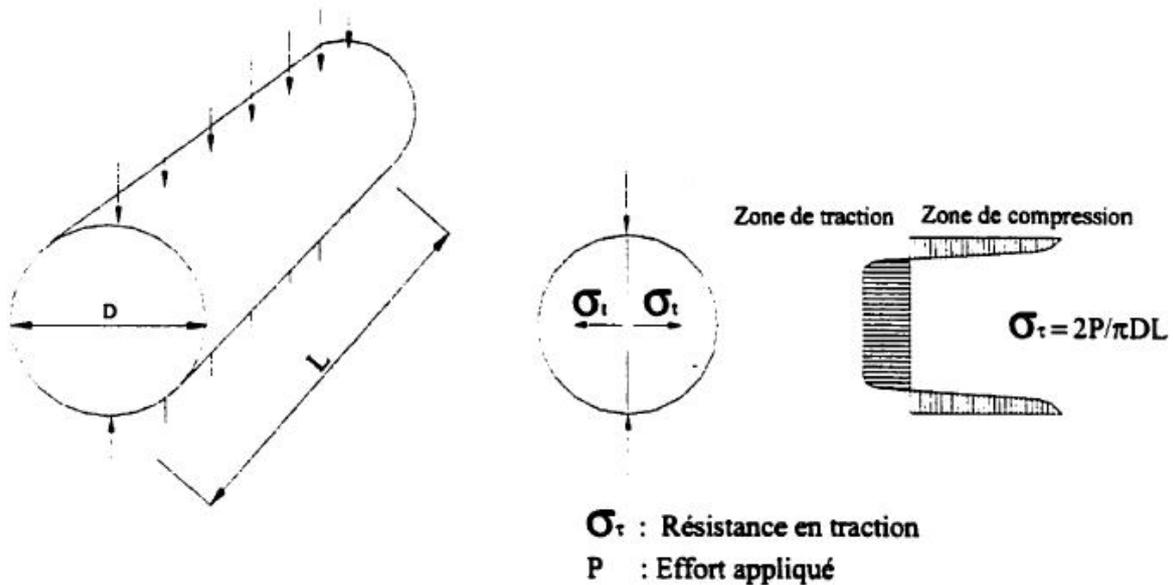


Figure 5-41 Distribution des contraintes lors de l'essai Brésilien.

Lors de l'essai, le même taux de charge que celui utilisé lors de l'essai de compression est appliqué. Pour ce qui est de la cure des échantillons, la même procédure que celle mentionné pour les résistances à la compression est utilisée.



Photo 5-2 : rupture des éprouvettes « l'essai brésilien ».

Les résultats de l'essai effectué sur des bétons à base des agrégats de ziani ,d'Ain Touta et d'El Hadjeb respectivement avec le dosage de 350kg/m^3 . sont présentés dans les tableaux 5-23 5-24 5-25 et qui ont bien démontré l'influence de type des granulats sur les propriétés mécaniques.

Tableau 5-23: Influence de l'ajout de filler et de super plastifiant sur la résistance des bétons a la traction à base d'agrégats d El Hadjeb.

HTS Dosages	8% filler 0.25 % adj	R _C 28 jour MPA
350 kg/m ³	Sans adj	3.02
	avec adj	3.23
	Ajout+adj	2.61

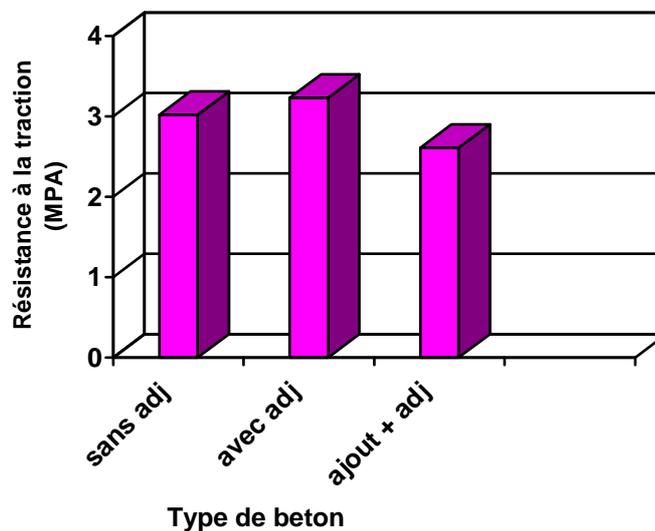


Figure 5-42 : Résistance à la traction (Essai Brésilien) des bétons à base des agrégats d El Hadjeb.

Tableau 5-24: Influence de l'ajout de filler et de super plastifiant sur la résistance des bétons à la traction à base d'agrégats d Ain Touta.

HTS Dosages	8% filler 0.25 % adj	R _C 28 jour MPA
350 kg/m ³	Sans adj	3.61
	avec adj	3.98
	Ajout+adj	3.61

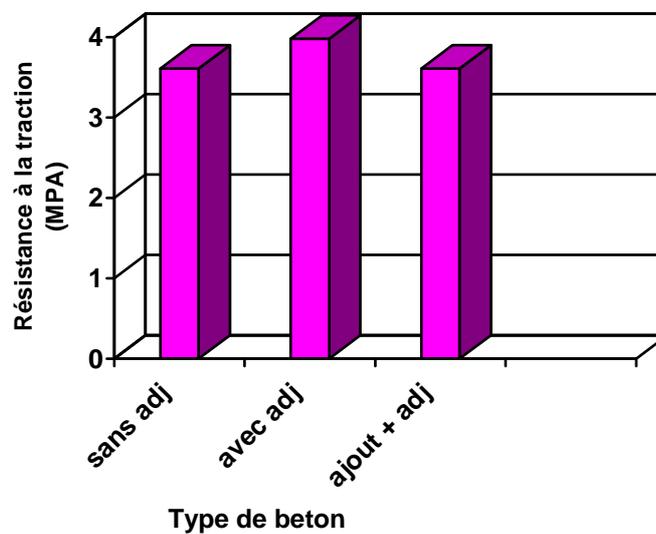


Figure 5-43 : Résistance à la traction (Essai Brésilien) des bétons à base des agrégats d Ain Touta

Tableau 5-25: Influence de l'ajout de filler et de super plastifiant sur la résistance des bétons a la traction à base d'agrégats de ziani .

HTS Dosages	8% filler 0.25 % adj	R _C 28 jour MPA
350 kg/m ³	Sans adj	3.61
	avec adj	4.22
	Ajout+adj	3.11

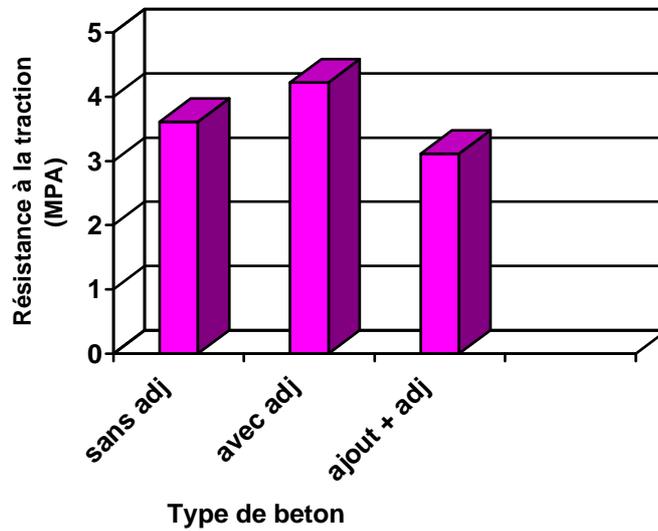


Figure 5-44 : Résistance à la traction (Essai Brésilien) des bétons à base des agrégats de ziani.

Pour la résistance à la traction par fondage et à la flexion , on constate des figures (5-38), (5-39), (5-40) ,(5-42) ,(5-43) et(5-44) respectivement qu'avec un dosage de béton de 350kg/m³ ,il y a une légère augmentation de la résistance que se soit à la traction ou à la flexion avec un ajout de super plastifiant . Et une légère diminution de la résistance avec l'ajout de filler + super plastifiant et cela est due à l'ajout de filler qui a un effet néfaste.

La meilleur résistance est celle du béton à base da gravier de ziani par rapport au gravier d'Ain Touta et d'El Hadjeb.

5.9- CONCLUSION :

Le programme expérimental réalisé dans le cadre de ce projet a pour but de formuler et d'étudier un béton a base des granulats de la région de Biskra. La formulation du béton avec deux méthodes et deux affaissements fermes et plastiques avec cinq dosages de ciment. Nous avons étudié l'effet des granulats sur les caractéristiques mécaniques et hygrométriques du béton.

Les résultats de ce programme nous ont permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- On a des difficultés d'ouvrabilités du béton avec un affaissement ferme, mais muni de forte résistance à la compression par rapport au béton plastique.
- Parmi les dosages des bétons étudiés, on constate que le dosage de 350 kg/m³ donne les meilleures résistances à la compression avec un rapport E/C et G/S optimale pour les deux méthodes utilisées.
- * Par la notion du besoin en eau, paramètre spécifique pour chaque granulat, nous avons pu caractériser chaque type de granulat et par la suite son influence sur les propriétés du mélange en béton.
- Lors de la formulation des bétons on remarque que la méthode de Skramtaev et plus facile et plus rapide que celle de Dreux Gorisse .

- La méthode de Dreux Gorisse , pour assurer la même résistance du béton , exige beaucoup plus de liant que la méthode de Skramtaev , on pourrait dire que cette méthode assure surtout l'ouvrabilité désirée.
- * Le paramètre besoin en eau E pour la composition du mélange du béton prenant en considération ce paramètre exige de correction du dosage en eau , pour les méthodes Skremtaev et de Dreux qui nécessite des corrections.
- Les super plastifiants contribuent à l'amélioration de la maniabilité et de la résistance des bétons pour les trois granulats étudiés.
- Le contrôle de la maniabilité des bétons d'un super plastifiant est difficile, d'où l'utilisation d'un retardateur de prise est nécessaire.
- L'effet filler de la poudre de carrelage a contribué à l'amélioration de la maniabilité et de résistances mécaniques à la compression, alors qu'il y a une diminution de la résistance à la traction et à la flexion avec l'ajout d'un (super plastifiant + filler).
- L'addition de la poudre de carrelage a donné un effet bénéfique à un dosage de 8% du poids de ciment.
- Lors de cette étude on peut conclure que les granulats de ziani viennent au premier lieu du point de vue résistance mécanique, puis viennent au deuxième lieu les granulats d'AinTouta et enfin ceux d'EL hadjeb.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le début était une vaste enquête auprès des praticiens, au cours de laquelle nous avons senti le besoin ou l'intérêt commun de constituer une sorte de banque de données sur les matériaux de la région et les constituants du béton.

Ceci afin de combler un manque quasi-total d'informations sur tous les aspects de la mécanique des bétons.

Cette mémoire, à travers les résultats des essais portant sur une large variété de bétons (à base de granulats concassés de la région de Biskra), constitue une des réponses aux attentes des praticiens de la région. Les différents résultats concernant la maniabilité, le squelette granulaire optimum, la densité, et la variété des bétons, seront sans aucun doute d'un grand intérêt pour des prises de décision quant au choix des matériaux, des formulations, des propriétés des bétons attendues, etc...

Les résultats d'essais portant sur une variété de bétons pour lesquels le squelette granulaire est optimisé, renseignent sur certaines propriétés des bétons durcis notamment les résistances en compression, en flexion et en traction à 7, 28 et 90 jours, et leur évolution en fonction de la quantité d'eau et de ciment introduite dans le béton.

Nous avons tenté de découvrir et d'expliquer théoriquement puis expérimentalement, les liens existants entre les caractéristiques des granulats et les propriétés des bétons.

-Le choix des granulats donc, d'après cette étude, porte principalement sur la nature minéralogique, la masse volumique, la propreté, la dureté, la granulométrie, l'absorption d'eau, etc....

- Dans tous les cas, une grande importance est attachée au paramètre régularité qui va conditionner la constance de la maniabilité et du rapport E/C.

En effet, du fait de l'incidence des transports sur le coût des matériaux, l'utilisateur est en général tributaire des productions de proximité.

Conclusions et recommandations

Donc, le choix des matériaux est restreint par ce facteur de coût.

Mais l'utilisateur doit connaître au moins les technologies mises en œuvre dans les exploitations de granulats. Ces technologies permettent aux producteurs de répondre aux exigences de qualité requises et donner l'assurance de fourniture de granulats conforme aux normes.

Le contrôle de conformité porte sur les granulats, soit avant leur expédition, soit après leur livraison sur l'aire du stockage du chantier. Ce contrôle consiste à effectuer des prélèvements et des analyses pour apprécier, avec suffisamment de précision la conformité des lots à utiliser.

Il est à souligner que pour des raisons d'exploitation, les carrières exploitées sont sujettes à de nouveaux tests d'identification des matériaux produits.

Ce travail nous a permis de mieux comprendre les problèmes pratiques d'élaboration des bétons. L'importance des granulats sur le comportement des bétons n'est plus à souligner. La connaissance de leur nature minéralogique n'est pas toujours facile, car les études pétrographiques ne sont pas très courantes en Algérie.

Il est primordial de chercher des constituants présentant de la qualité requise pour avoir un béton de résistance élevée. Malheureusement ce point n'est pas suffisant car même avec des matériaux de qualités exceptionnelles on risque d'avoir un béton de mauvaise qualité du point de vue résistance et durabilité si sur chantier il n'y a aucune garantie du respect de la formulation trouvée lors de l'étude de la composition au laboratoire. Les conséquences du non respect de la formulation sur la durabilité sont importantes, si le béton de la zone d'enrobage, par exemple, est trop perméable ou présente des fissures, conséquence d'une mauvaise fabrication, la corrosion peut alors se développer, cette dernière représente le type de dégradation le plus fréquent.

Les ressources de granulats calcaires exploitables en Algérie sont réellement importantes leur caractéristiques intrinsèques répondent aux spécifications exigées pour un béton hydraulique. Le taux de fillers est trop élevé (allant jusqu'à 30%) et le traitement de dépoussiérages inexistant dans toutes les carrières d'Algérie, toute fois, un lavage à fond qui éliminera les fillers inclus dans les sables et les graviers, donnera des bonnes résistances du béton.

PERSPECTIVES

- 1.** Introduire une combinaison d'adjuvant (superplastifiant + retardateur de prise) dans la formulation du béton des granulats concassés.
- 2.** Formuler des bétons à base des granulats concassés avec des fibres d'acier ou des fibres de verre.
- 3.** Formuler des bétons à base des granulats concassés avec des adjuvants réducteurs de retrait.
- 4.** Etudier l'effet de fluage du matériau béton à base des granulats concassés.
- 5.** Etudier l'effet du retrait endogène et du retrait de séchage séparément des bétons à base des granulats concassés.
- 6.** Etudier la durabilité du matériau béton à base des granulats concassés et notamment dans un milieu agressif.
- 7.** Etudier la compacité-porosité des mélanges granulaires des bétons à base des granulats concassés et leurs propriétés intrinsèques.
- 8.** Etudier mécanismes de détérioration du béton à base des granulats concassés.
- 9.** Etudier Réaction alcalis-granulats (RAG) dans les bétons à base des granulats concassés
- 10.** Détermination de la forme des granulats et l'effet de la forme sur la rhéologie du béton à base des granulats concassés.
- 11.** Etudier l'influence de la carbonatation sur la porosité et la perméabilité des bétons à base des granulats concassés.